

MIESIĘCZNIK
POŁOCKI.

Т о м I.
Р о к 1818.

№ 2(48), 2023

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



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.

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

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

Подписано к печати 07.09.2023. Бумага офсетная 80 г/м². Формат 60×84¹/₈. Цифровая печать.
Усл. печ. л. 13,95. Уч.-изд. л. 16,82. Тираж 50 экз. Заказ 356.

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.9.06+372.8

DOI 10.52928/2070-1616-2023-48-2-2-12

СОВРЕМЕННАЯ ПАРАДИГМА ПОЗНАНИЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

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

Предложена парадигма познания металлорежущих станков, соответствующая постулатам механики – принципу разветвления энергии движения в цепях и принципу возможных перемещений. Описана методология синтеза (создания) и анализа кинематической структуры металлорежущих станков. Представлены основы теории формообразования реальных поверхностей в машиностроении. Дано понятие о классах воспроизведения реальных поверхностей. Проанализировано функциональное проектирование, или синтез кинематической структуры металлорежущих станков по функции, задаваемой способами формообразующей обработки. Рассмотрено использование парадигмы познания при анализе кинематических схем металлорежущих станков.

Ключевые слова: металлорежущие станки, парадигма познания, методология парадигмы, способ формообразующей обработки, функциональное проектирование, частная кинематическая структура металлорежущих станков, обобщенная кинематическая структура металлорежущих станков, анализ кинематической схемы известного станка.

Введение. С точки зрения науки принципиальной особенностью ее развития в 30-е годы XX столетия выступает общая теория систем. Биолог-теоретик и философ Л. фон Берталанфи, автор этой теории, так определил ее сущность [1]: «Общая теория систем – это логико-математическая область, задачей которой является формулирование и вывод общих положений, возможных при рассмотрении систем вообще». Наука о системах занимается свойствами отношений исследуемых системных объектов и интеграцией с основанными на эксперименте традиционными научными дисциплинами. Закономерность возникновения науки о системах можно объяснить тем, что к моменту ее появления в различных областях теории и практики, основанных на экспериментальных исследованиях, сложился значительный массив совокупностей операций теоретического и практического освоения действительности, подчиненных решению конкретной задачи. Эта наука содержит минимальное количество допущений, а ее основы базируются на логике, что позволяет отнести данную научную дисциплину к точным наукам.

Общая теория систем стала исходной базой синергетики – нового объединяющего направления в современной науке, возникшей в конце 70-х годов XX столетия. Предложенный физиком Г. Хакеном, создателем синергетического направления, термин «синергетика» (Sinergeia) происходит от греческих слов («син» – совместный; «эргос» – действовать) [2]. Поэтому синергетика – это наука о совместном, согласованном поведении многих элементов как единого целого в составе сложной системы [3]. Синергетику, по Г. Хакену, можно рассматривать как часть общего системного анализа, поскольку и в синергетике, и в системном анализе основной интерес представляют общие принципы, лежащие в основе структуры, и функции (принцип работы) систем различной природы. Общая теория систем и расширяющая ее синергетическая концепция – это по существу фундамент эволюционного естествознания, который позволяет говорить о возникновении единого языка инженера, естествознателя и гуманитария.

Основополагающее понятие системной концепции – это система. Известны попытки дать ей однозначное определение. Как правило, они не альтернативны, а взаимно дополняют друг друга. Поэтому воспользуемся известным определением системы, наиболее приемлемым для парадигмы познания станочного оборудования [4]. Системой назовем совокупность целесообразно организованных, функционально связанных элементов, участвующих в процессе достижения определенной цели, выступающую по отношению к другим системам и окружающей среде как нечто единое. Качественная определенность системы обусловлена ее структурой и функцией. Под структурой будем понимать схему связей и отношений между элементами системы, а под функцией – целенаправленное поведение (функционирование) системы, или порядок осуществления процесса. Из приведенного определения системы следует, что любой способ формообразующей обработки и реализующая его технологическая машина, например, металлорежущий станок, могут быть отнесены к категории системных в том случае, если они обладают целостностью, а их свойства и функция не сводятся непосредственно к свойствам и функциям составляющих их элементов. В патентоведении виртуальное (способ формообразующей обработки) и реальное (технологическая машина, например, металлорежущий станок) технические решения связаны между собой общим творческим или изобретательским замыслом.

Основная часть. Методология современной парадигмы познания металлорежущих станков. С точки зрения теории технических систем (частная теория общей теории систем) металлорежущий станок можно рассматривать в виде объединения трех подсистем: кинематической структуры, подсистемы управления и подсистемы

компоновки, или несущей подсистемы. Однако первичной базой большинства конструкций металлорежущих станков является кинематическая структура, т.к. назначение такой технологической машины – создание относительных движений инструмента и заготовки, необходимых для получения заданных поверхностей на твердом теле. Поэтому, как правило, познание металлорежущих станков осуществляется посредством изучения их кинематической структуры.

Несмотря на разнообразие металлорежущих станков, предназначенных для выполнения не только различных, но и однотипных технологических операций, кинематическая структура любого из них базируется на ряде основных достаточно общих кинематических закономерностей, присущих всем станкам. В конструкции металлорежущих станков кинематическая структура выражается кинематической схемой. Развитость ее, в первую очередь, зависит как от сложности воспроизводимых поверхностей, так и от количества исполнительных органов, используемых источников энергии движения и подсистемы управления.

Методология рассматриваемой парадигмы включает три логически связанные части: основы теории формообразования реальных поверхностей при формообразующей обработке, функциональное проектирование кинематической структуры станочного оборудования по функции, задаваемой соответствующим способом формообразующей обработки, и анализ обобщенных структурных и кинематических схем станков.

Основы теории формообразования реальных поверхностей. Форма любой детали есть замкнутое пространство, ограниченное реальными геометрическими поверхностями, которые образованы в результате обработки тем или иным способом, например, резанием, штамповкой, литьем и т.д. Исходя из этого, автор теории кинематической структуры металлорежущих станков показал [5], что теоретически процесс формирования реальных поверхностей на станках аналогичен процессу образования идеальных поверхностей в проективной геометрии, т.е. базируется на идеальных геометрических представлениях. Любая геометрическая поверхность – это след движения одной производящей линии, называемой образующей, по другой производящей линии, называемой направляющей. Производящие линии на металлорежущих станках образуются посредством вспомогательных элементов в виде материальной точки или линии, материализованной на режущей кромке инструмента, за счет согласованных относительных движений заготовки и инструмента. Различные инструменты, например, токарный резец, имеет один вспомогательный элемент, другие, например, червячная фреза, – несколько последовательно расположенных вспомогательных элементов. По существу, вспомогательный элемент – это часть режущих кромок, перемещающихся по воспроизводимым линиям в процессе формообразования реальных поверхностей.

Вспомогательный элемент будем рассматривать как множество материальных точек M_{ε} . Тогда в общем виде совокупность вспомогательных элементов любого инструмента – это вполне определенный класс P множеств M_{ε} :

$$P = \{M_{\varepsilon}\}_i, (i = 1, 2, 3, \dots k).$$

Класс P – это математическое представление вспомогательных элементов любого инструмента при формообразующей обработке. Будем называть класс P характеристическим образом инструмента, т.к. именно этот класс определяет поведение производящих линий в процессе формообразования производящих линий.

На металлорежущих станках производящие линии, как правило, образуются (имитируются) непрерывно в течение всего времени формообразования поверхности. В процессе непрерывной имитации обеих производящих линий и образуется с помощью резания требуемая поверхность.

На языке теории множеств воспроизводящие линии рассматриваются как вполне определенные множества точек M_o и M_n . Тогда любая поверхность в произвольный момент времени – это произведение двух одномерных множеств, каждое из которых является однозначным отображением характеристического образа инструмента на производящие (виртуальные) линии. На этой основе в работе [4] иллюстрируются и подробно рассматриваются, как во времени образуются одномерные множества, а именно образующая и направляющая. В итоге решения данной задачи получено многообразие осуществимых классов образования реальных поверхностей на вербальном языке и в скобках на языке теории множеств при обработке на металлорежущих станках: касание–касание ($P-P$), касание–след ($P-H^C$), касание–обкат ($P-H^K$), след–касание (H^C-P), след–след (H^C-H^C), след–обкат (H^C-H^K), обкат–касание (H^K-P), обкат–след (H^K-H^C), обкат–обкат (H^K-H^K), копирование–касание ($E-P$), копирование–след ($E-H^C$), копирование–обкат ($E-H^K$), где P , H^C , H^K , E – прерывистый, непрерывный при скольжении, непрерывный при качении, одновременный классы воспроизведения образующей и направляющей при формообразующей обработке.

Функциональное проектирование кинематической структуры станочного оборудования по функции, задаваемой соответствующим способом формообразующей обработки. В этом случае функциональное проектирование пересекается с научно-технической экспертизой изобретений, поскольку позволяет проследить путь создания, или «изобретения», виртуального технического решения – способа формообразующей обработки, и реального технического решения – кинематической структуры металлорежущего станка, связанных общим творческим или изобретательским замыслом при определенных условиях, защищаемых патентами.

Процесс функционального [6] проектирования носит итерационный характер, т.е. от этапа к этапу, от анализа соответствующего способа формообразующей обработки последовательно приближаясь к решению поставленной задачи.

Методику функционального проектирования рассмотрим на примере классического способа нарезания резьбы фасонным резцом.

При включении электродвигателя энергия движения по кинематической связи 8–9 будет сообщаться через звено 9 в кинематическую связь 6–7. Это вызовет вращение B_1 шпинделя, несущего заготовку, и продольное перемещение P_2 каретки, несущей резец. В итоге характеристический образ резца будет совершать относительно заготовки винтовое движение $\Phi_v(B_1P_2)$. При этом соотношение элементарных движений B_1 и P_2 зависит только от произведения передаточных отношений передач, образующих кинематическую связь 6–7. Таким образом, эта связь, при функционировании имитирующая передачу винт–гайка, будет обеспечивать качественную характеристику движения $\Phi_v(B_1P_2)$, т.е. его траекторию. Кинематическая связь, воспроизводящая траекторию исполнительного движения, называется внутренней связью. Количественную характеристику исполнительного движения, т.е. скорость, или темп воспроизведения направляющей винтовой поверхности, обеспечивает кинематическая связь 8–9. Такую связь принято называть внешней связью. Внутренняя и внешняя связи имеют общее звено 9, называемое звеном соединения связей.

Совокупность источника (источников) энергии движения исполнительных органов, внутренней и внешней связей принято называть *кинематической группой* [5] с наименованием, соответствующим движению, которое создает эта группа.

Сложное винтовое движение $\Phi_v(B_1P_2)$ имеет незамкнутую траекторию. Следовательно, оно должно настраиваться по всем пяти параметрам. Для этого во внутреннюю связь установим два органа настройки: i_x и R_1 . Посредством первого из них настраивают шаг нарезаемой резьбы, посредством второго – возможность нарезания левой или правой резьбы. Во внешней связи установим орган настройки на скорость i_v воспроизведения направляющей и технологический реверс R_2 , предназначенный для реверсирования движения формообразования при многопроходной обработке в исходное положение или при задании направления нарезания резьбы к передней бабке или от нее.

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

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

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

Внутренняя связь:

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

Внешняя связь:

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

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

Таким образом, функционирование технической системы однозначно соответствует известному постулату теоретической механики – принципу разветвления энергии движения в цепях независимо от их природы.

На четвертом этапе на основе другого постулата теоретической механики – принципе возможных перемещений [5], известном как принцип Даламбера, выводят формулы настройки (ФН) для органов настройки i_x и i_v .

Орган настройки на траекторию сложного формообразующего движения i_x . Внутренняя связь кинематической группы $\Phi_v(B_1P_2)$ и расчетная цепь для этого органа настройки совпадают. Следовательно, расчетные перемещения (РП) для органа настройки i_x имеют вид:

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

где P – шаг нарезаемой резьбы.

Тогда уравнение расчетной кинематической цепи (УКЦ):

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

где i_{01} – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи; P_{TB} – шаг (кинематическая характеристика) тягового вала.

Откуда ФН:

$$i_x = P/c_1,$$

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

Орган настройки i_v на скорость воспроизведения направляющей – винтовой линии. Расчетная цепь связывает электродвигатель M со шпинделем 3 станка. Следовательно, РП для органа настройки i_v имеют следующий вид:

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

Тогда УКЦ:

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

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

Откуда ФН:

$$i_v = n_{ш}/c_2,$$

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

Аналогично проектируется частная кинематическая структура токарных станков для обработки цилиндрических и торцевых поверхностей по функциям соответствующих способов обработки. Процедура проектирования подробно рассмотрена в работе [6].

Для способов обработки винтовой (резьбовой), цилиндрической и торцевой поверхностей характерно одинаковое относительное положение траекторий движений B_1 и P_2 . Одинаково также абсолютное геометрическое положение заготовки и инструмента в горизонтальной плоскости. Поэтому в частных структурах технологическая компоновка исполнительных органов – шпинделя и суппорта – одинакова. Следовательно, частные структурные схемы можно объединить в обобщенную структурную схему универсального токарно-винторезного станка. Процедура обобщения и анализ полученной кинематической структуры универсального станка подробно рассмотрены в работе [6].

Методика функционального проектирования кинематической структуры создавалась при разработке структурных схем на базе механических передач. Создание мехатронных технических систем, в т.ч. металлорежущих станков с ЧПУ, привело к созданию сложных гибридных формообразующих групп, в которых внутренняя связь, задающая траекторию сложного исполнительного движения, представляет собой объединение механических и электронных связей на базе типовых интегральных схем. В связи с этим целесообразно рассматривать функциональное проектирование в методике познания станочного оборудования с ЧПУ.

Функциональное проектирование мехатронной кинематической структуры станка. Анализ известных источников показывает, что исторически первой в сложных гибридных формообразующих группах, воспроизводящих станочное зацепление, имитирующее конкретную передачу, функциональная связь исполнительных органов группы осуществляется отслеживающей синхронизацией по схеме задающая–ведомая координаты. Обязательным условием при этом является использование на каждом исполнительном органе отдельного регулируемого электродвигателя.

Проектирование мехатронной кинематической структуры рассмотрим на примере разработки частной структуры станка для нарезания резьбы (рисунок 3). Этапы анализа способа нарезания резьбы фасонным резцом и оформления исполнительных органов станка аналогичны рассмотренным выше.

Этап графического оформления связей между исполнительными органами и настройкой на траекторию сложного формообразующего движения отличается использованием настраиваемого электронного вала, или синхронной следящей системы. Для осуществления сложного формообразующего движения $\Phi_v(B_1P_2)$, воспроизводящего направляющую – винтовую линию нарезаемой резьбы, соединим шпиндель 3 , несущий заготовку, с тяговым валом $ТВ$ суппорта 5 , несущего резец 2 . Для этого соединим шпиндель 3 (задающая координата) посредством механической передачи 7 с импульсным измерительным преобразователем 8 . Выход этого преобразователя соединим с входом управляемого делителя частоты, выполненного в виде счетчика импульсов 9 и блока задания коэффициента деления 10 . Выход счетчика 9 делителя частоты соединим с входом импульсно-аналогового преобразователя 11 . Выход этого преобразователя соединим через предварительный усилитель 12 и усилитель мощности 13 с электродвигателем M_2 , кинематически связанным с тяговым валом $ТВ$ привода суппорта 5 (ведомая координата). Ведущую координату – шпиндель 3 – кинематически соединим с электродвигателем M_1 .

Запишем связи проектируемой гибридной структурной схемы на языке символов. Внутренняя связь – мехатронная цепь, включающая механические передачи и типовые интегральные схемы:

$$B_1 \leftarrow 3 \leftarrow 7 \rightarrow (\text{синхронная следящая система: } 8 \rightarrow 9 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow 13) M_2 \rightarrow \\ \rightarrow ТВ \rightarrow 5 \rightarrow P_2.$$

Внешняя связь:

$$M_1 \rightarrow 3 \rightarrow 7 (\text{звено соединения связей}).$$

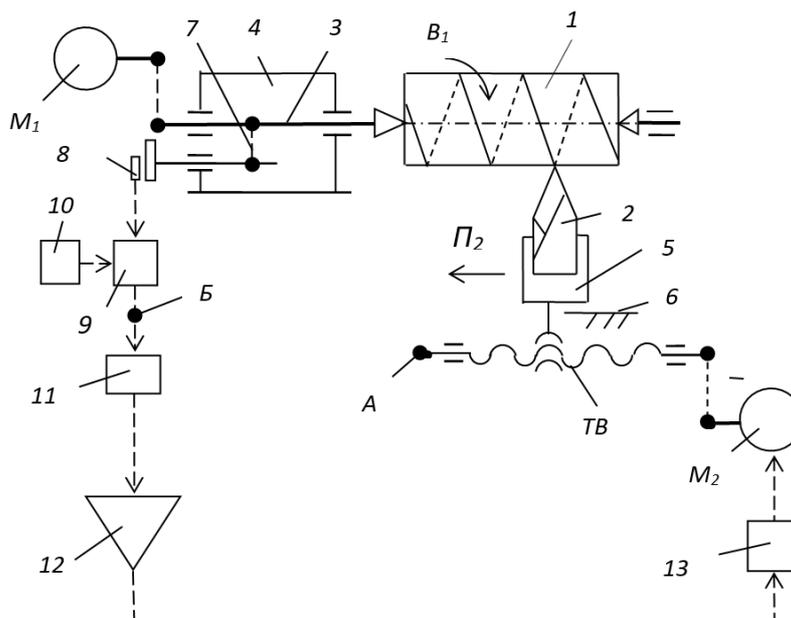


Рисунок 3. – Гибридная структура резбонарезного станка с системой синхронизации по схеме задающая–ведомая координаты

Принципиальной особенностью данной гибридной схемы является размещение электродвигателя M_2 ведомой координаты во внутренней связи формообразующей группы. Поэтому в качестве этого электродвигателя необходимо использовать высокомоментную машину постоянного тока или синхронную машину переменного тока. В качестве электродвигателя M_1 можно использовать менее дорогую традиционную асинхронную машину переменного тока.

Движение $\Phi_v(B_1P_2)$ имеет незамкнутую траекторию и настраивается по всем пяти параметрам: на траекторию – делителем частоты 9–10; на скорость – посредством задания величины напряжения при использовании электродвигателя постоянного тока или частоты переменного тока при использовании электродвигателя переменного тока; на направление, исходное положение и путь – программно на программноносителе или непосредственно на дисплее устройства ЧПУ в соответствующем коде.

Делитель частоты (счетчик 9 – блок установки коэффициента деления 10) является аналогом механического органа настройки на траекторию (например, гитары сменных зубчатых колес). Поэтому коэффициент деления определим по методике определения передаточного отношения механического органа настройки на траекторию. Следовательно, РП для коэффициента деления имеют вид:

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

Тогда УКЦ:

$$P = 1 \cdot k_d \cdot i_0 \cdot P_{ТВ},$$

где k_d – коэффициент деления; P – шаг нарезаемой резьбы; i_0 – передаточное отношение передачи, связывающей электродвигатель M_2 с тяговым валом; $P_{ТВ}$ – шаг тягового вала.

Откуда ФН:

$$k_d = P / (i_0 P_{ТВ}).$$

Станок функционирует следующим образом. При включении управляемого электродвигателя M_1 ведущая координата – шпиндель 3 – получает движение B_1 с круговой частотой, соответствующей скорости воспроизведения направляющей винтовой поверхности. Вращательное движение шпинделя непрерывно преобразуется в импульсном измерительном преобразователе 8 в высокочастотный импульсный сигнал, пропорциональный круговой частоте движения B_1 . Этот сигнал поступает в счетчик 9 делителя частоты, где происходит его деление в соответствии с заданным на блоке 10 коэффициентом деления. Импульсный сигнал с выхода делителя частоты преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 11 в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, и с его выхода через предварительный усилитель 12 поступает на усилитель мощности 13. С выхода этого усилителя задающий сигнал поступает на управляемый электродвигатель M_2 , который посредством тягового вала TB сообщает движение P_2 ведомой координате – суппорту 5, несущему резец. В результате такого прохождения сигнала от ведущей координаты к ведомой обеспечивается воспроизведение винтовой линии резьбовой поверхности сложным двухэлементарным движением $\Phi_v(B_1P_2)$.

Полученная в результате функционального проектирования мехатронная структурная схема используется преимущественно в качестве частной резьбонарезной кинематической структуры в универсальных токарно-винторезных станках с ЧПУ, например, в станке модели 16К20Ф3.

При функционировании структурной схемы девиация механики ведомой координаты (электродвигатель M_2 – тяговый вал TB – суппорт 5) проецируется на воспроизводимую винтовую поверхность. Это явление, снижающее качественные показатели резьбы, можно устранить посредством адаптивной двухсторонней коррекции задающего сигнала ведомой координаты. Для этого используем блок формирователя сигнала коррекции (рисунок 4). Этот блок содержит знаковый 1 и фазовый 2 дискриминаторы. Выход знакового дискриминатора 1 соединен с управляющим входом ключа 3, управляемого отрицательным потенциалом, и с управляющим входом ключа 4, управляемого положительным потенциалом. Выход фазового дискриминатора 2 соединен посредством импульсно-аналогового преобразователя 5 с аналоговыми входами ключей 3 и 4. Выход ключа 3 соединен со вторым входом сложения параллельного сумматора 6, а выход ключа 4 – с входом вычитания этого сумматора.

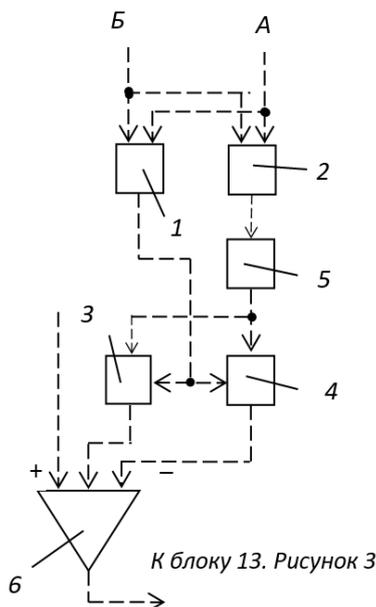


Рисунок 4. – Формирователь сигнала коррекции задающего сигнала

Первые входы обоих дискриминаторов соединим с разъемом **Б** (см. рисунок 3). Вторые – с импульсным измерительным преобразователем, который установим на тяговом валу TB (см. рисунок 3, позиция **А**). Из структурной схемы (см. рисунок 3) исключим предварительный усилитель **12**, а выход импульсно-аналогового преобразователя **11** соединим с первым входом сложения параллельного сумматора **6** формирователя сигнала коррекции. Выход параллельного сумматора соединим с усилителем мощности **13**.

Двухсторонняя коррекция задающего сигнала, действующего на выходе параллельного сумматора **6**, осуществляется следующим образом. На первых входах знакового **1** и фазового **2** дискриминаторов постоянно действует задающий импульсный сигнал с выхода счетчика **9** делителя частоты. На вторые входы обоих дискриминаторов непрерывно с импульсно-аналогового преобразователя, устанавливаемого на тяговом валу, поступает импульсный сигнал – аналог скорости движения P_2 суппорта **5** (см. рисунок 3, позиция **А**). В результате сравнения сигналов на выходе знакового дискриминатора **1** образуется отрицательный потенциал при отставании ведомой координаты от заданного значения и положительный потенциал при его опережении. Этот потенциал поступает на управляющие входы ключей **3** и **4**. Одновременно на выходе фазового дискриминатора **2** образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе **5** поступает на аналоговые входы ключей **3** и **4**. Этот сигнал поступает на параллельный сумматор **6** через один из ключей в зависимости от знака управляющего воздействия. При отставании ведомой координаты сигнал абсолютной погрешности поступает через ключ **3**, управляемый отрицательным потенциалом, на второй вход сложения параллельного сумматора **6**, а при опережении – через ключ **4**, управляемый положительным потенциалом, на вход вычитания этого сумматора. В итоге в параллельном сумматоре **6** происходит в зависимости от знака погрешности увеличение или уменьшение управляющего сигнала ведомой координаты, т.е. происходит его непрерывная, двухсторонняя коррекция относительно номинального значения.

Возможно также использование системы синхронизации по схеме равнозначных координат с двухсторонней адаптацией управляющего сигнала обеих координат¹. В этом варианте необходимо использовать управляемые электродвигатели одного типа.

Анализ кинематической схемы станка. Рассмотрим использование приведенный выше парадигмы познания на примере токарно-револьверного станка модели 1Г340, широко представленного в современной учебной литературе.

Станок модели 1Г340 относится к станкам с горизонтальной осью револьверной головки, имеющей 16 гнезд для различных инструментов. На станке можно обрабатывать детали как из прутка, так и из заготовок. Область использования – серийное производство. Кинематическая схема станка представлена на рисунке 5.

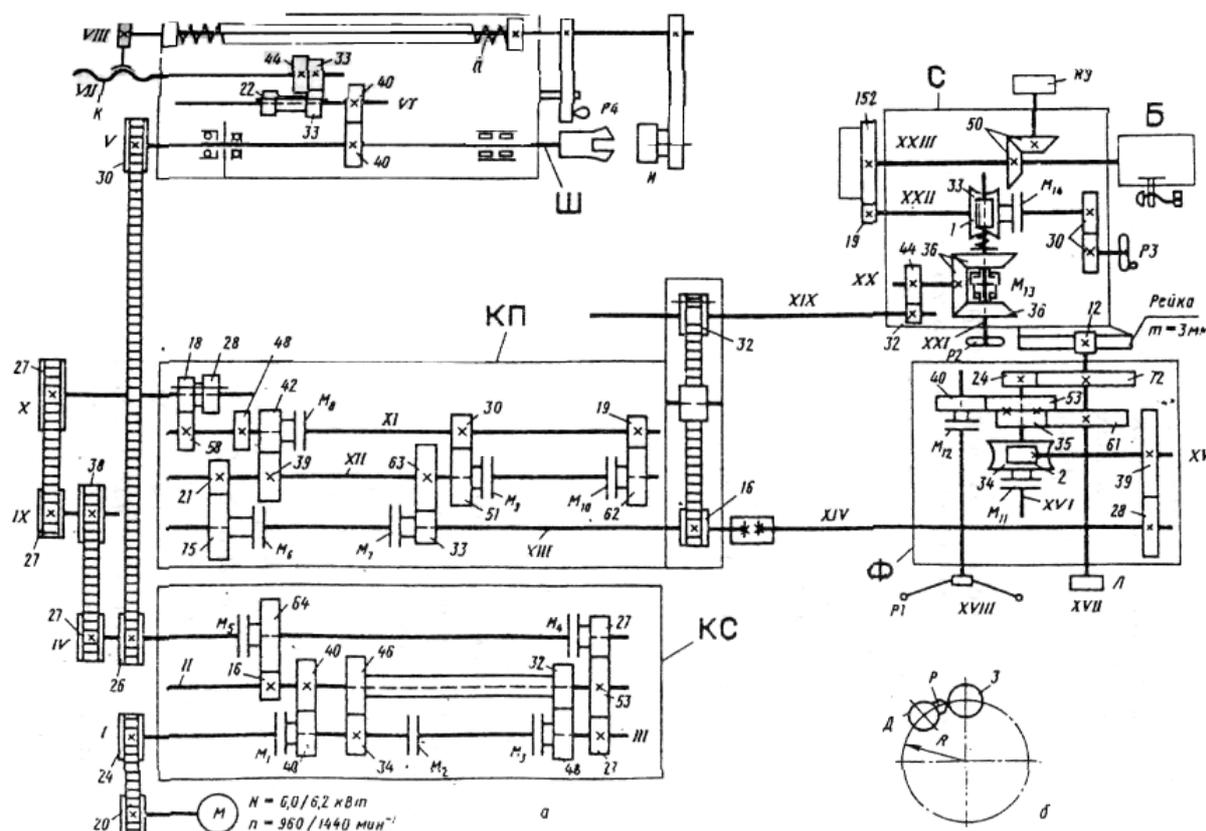


Рисунок 5. – Кинематическая схема токарно-револьверного станка модели 1Г340

Техническая характеристика. Максимальный диаметр обрабатываемого прутка 40 мм; максимальный диаметр заготовки, обрабатываемой в патроне, 400 мм; количество частот вращения шпинделя – 12, диапазон частот вращения шпинделя 45–2000 мин⁻¹; количество продольных и поперечных (круговых) подач – 12, диапазон подач: продольных 0,035–1,6 мм/об, поперечных (круговых) 0,02–0,8 мм/об.

Формообразующая часть кинематической структуры станка включает две основные частные структуры: токарную $\Phi_v(B_1)$, $\Phi_{s1}(P_2)$ для продольной обработки и токарную $\Phi_v(B_1)$, $\Phi_{s2}(B_3)$ для поперечной (торцевой) обработки. Группа скорости резания $\Phi_v(B_1)$ входит в обе частные структуры. Переход от одной структуры к другой осуществляется посредством механизмов управления станка.

Структура для продольной обработки состоит из простых групп скорости резания $\Phi_v(B_1)$ и продольной подачи $\Phi_{s1}(P_2)$, соединенных между собой электродвигателем M и общей частью внешних связей шкив 20, установленный на валу электродвигателя, – выходной вал IV коробки скоростей $КС$.

Группа $\Phi_v(B_1)$ воспроизводит образующую (окружность) обрабатываемой поверхности. Ее внутренняя связь:

подшипниковые опоры шпиндельной коробки → шпиндель Ш (вал V) (B_1).

¹ Устройство для синхронизации приводов исполнительных органов шлифрезерного станка: пат. ВУ 16976 / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 26.12.2012.

Внешняя связь – кинематическая цепь, состоящая из двух зубчато-ременных передач и коробки скоростей KC , соединяющая двухскоростной электродвигатель M со шпинделем, являющимся звеном соединения связей:

$$M \rightarrow 20/24 \rightarrow KC \rightarrow 26/30 \rightarrow \text{шпиндель } (B_1).$$

Группа настраивается на скорость изменением круговой частоты электродвигателя и коробкой скоростей KC (орган настройки i_v) и на направление – реверсированием направления вращения электродвигателя. При этом переключение частоты вращения шпинделя осуществляется посредством электромагнитных муфт M_1 – M_5 автоматически при смене позиций револьверной головки в соответствующие положения по программе, заданной на штекерной панели пульта управления.

Расчетная цепь для органа настройки на скорость совпадает с внешней связью группы. Поэтому РП для круговой частоты вращения шпинделя имеют вид:

$$n_m \text{ мин}^{-1} \text{ электродвигателя} \rightarrow n_i, \{i = 1, 2, 3, \dots, 12\} \text{ шпинделя } (B_1) \text{ мин}^{-1}.$$

Ряд круговых частот шпинделя образует геометрическую прогрессию с $\phi = 1,41$. Предельные значения круговых частот вращения шпинделя:

$$n_1 = 960 \cdot \frac{20}{24} \cdot \frac{34}{46} (M_3) \cdot \frac{32}{48} \cdot \frac{27}{53} \cdot \frac{16}{24} (M_5) \cdot \frac{26}{30} = 45 \text{ мин}^{-1};$$

$$n_{12} = 1440 \cdot \frac{20}{24} (M_1) \cdot \frac{40}{40} \cdot \frac{53}{27} (M_4) \cdot \frac{26}{30} = 2000 \text{ мин}^{-1}.$$

Торможение шпинделя производится одновременным включением муфт M_4 и M_5 .

Группа $\Phi_{s1}(P_2)$ воспроизводит направляющую (прямую, параллельную линии центров станка) обрабатываемой поверхности. Ее внутренняя связь имеет вид:

$$\text{направляющие станины} \rightarrow \text{продольный суппорт } (P_2).$$

Внешняя связь – кинематическая цепь, соединяющая двухскоростной электродвигатель M с продольным суппортом, являющимся звеном соединения связей, посредством трех зубчато-ременных передач, коробки скоростей KC , коробки подач $KП$, фартука Φ и тягового вала (зубчато-реечной передачи):

$$M \rightarrow 20/24 \rightarrow KC \rightarrow 27/38 \rightarrow 27/27 \rightarrow KП \rightarrow \Phi \rightarrow 28/39 \rightarrow 2/34 \rightarrow 24/72 \rightarrow \\ \rightarrow \text{тяговый вал (зубчато-реечная передача)} \rightarrow \text{продольный суппорт } (P_2).$$

Группа настраивается на скорость (продольную подачу) коробкой подач $KП$ (орган настройки i_s), на путь – по упору с отсчетом величины пути по лимбу L , расположенному на валу $XVII$ фартука Φ . При каждом положении подвижного блока 18–28 при смене позиций револьверной головки в соответствующие положения по программе, заданной на штекерной панели пульта управления, автоматически посредством включения соответствующих электромагнитных муфт M_6 – M_{10} получается шесть ступеней продольной подачи.

Продольная подача включается муфтой M_{11} , при этом муфта M_{12} выключена (муфты заблокированы). Ручное перемещение осуществляется маховиком $P1$ через включенную муфту M_{12} , передачи 40/53, 35/61 и реечное колесо 12 (ведущее звено тягового вала). Автоматическое выключение продольной подачи в каждой позиции осуществляется упорами, установленными на барабане управления (БУ).

В известных учебниках для вузов [7; 8 и др.] утверждается, что «привод подачи осуществляется от шпинделя (вал V) через три зубчато-ременные передачи и коробку подач $KП$...». Данное утверждение наделяет шпиндель – исполнительный орган группы $\Phi_v(B_1)$ воспроизведения – образующей функцией источника энергии движения для группы $\Phi_{s1}(P_2)$ воспроизведения направляющей воспроизводимой поверхности. Такой подход к объяснению функции металлорежущих станков характерен для парадигмы познания, основанной только на принципе возможных перемещений, сложившейся в 50-е годы XX столетия, некорректен. Фактически отрицается принцип разветвления энергии движения в цепях, а физическая цепь подменяется расчетной цепью. Тем не менее, по сложившейся традиции эта парадигма познания металлорежущих станков доминирует в учебной литературе. Указанная некорректность устранена в представляемой парадигме.

В соответствии с принципом разветвления энергии движения шпинделю и суппорту анализируемого станка движение сообщается с выходного вала IV общего участка внешних связей (M – KC) формообразующих групп станка.

Для станков токарной группы принято задавать подачу относительно 1 оборота шпинделя. Для этого на основе принципа возможных перемещений назначается расчетная цепь, как правило, не совпадающая с внешней связью кинематической группы. Из этого правила следует, что расчетная цепь продольных подач анализируемой группы связывает шпиндель станка с тяговым валом. Для этой цепи РП имеют вид:

$$1 \text{ оборот шпинделя} \rightarrow s_{\text{прод.}} \text{ мм перемещения суппорта } (P_1).$$

Минимальная продольная подача:

$$s_{\text{прод.1}} = 1 \cdot \frac{30}{26} \cdot \frac{27}{38} \cdot \frac{27}{27} \cdot \frac{18}{58} (M_{10}) \cdot \frac{19}{62} \cdot \frac{21}{75} (M_6) \cdot \frac{28}{39} \cdot \frac{2}{34} (M_{11}) \cdot \frac{24}{72} \cdot \pi \cdot 3 \cdot 12 = 0,035 \text{ мм/об.}$$

Максимальная продольная подача:

$$s_{\text{прод.12}} = 1 \cdot \frac{30}{26} \cdot \frac{27}{38} \cdot \frac{27}{27} \cdot \frac{28}{48} (M_8) \cdot \frac{42}{39} \cdot \frac{63}{33} (M_7) \cdot \frac{28}{39} \cdot \frac{2}{34} (M_{11}) \cdot \frac{24}{72} \cdot \pi \cdot 3 \cdot 12 = 1,6 \text{ мм/об.}$$

Группа $\Phi_{s2}(P_3)$ воспроизводит направляющую обрабатываемой поверхности при торцовой обработке. Ее внутренняя связь:

$$\text{подшипниковые опоры} \rightarrow \text{револьверная головка } \Gamma(P_3).$$

Внешняя связь, соединяющая электродвигатель M с револьверной головкой, являющейся звеном соединения связей, включает общую с внешней связью группы $\Phi_{s1}(P_2)$ часть от электродвигателя до вала $XIII$ коробки подач $KП$ и последовательно расположенные передачи $16/32$, $32/44$, $36/36$ (реверс, управляемый муфтой M_{13}), $1/33$ (муфта M_{14}), $19/152$.

Группа настраивается на скорость круговую (торцовую) подачу коробкой подач $KП$, на путь – упорами, на направление – реверсом. Ручное круговое движение подачи осуществляется маховиком $P2$ при включенной муфте M_{14} . Ручной поворот револьверной головки при смене позиций осуществляется маховиком $P3$ при включенной муфте M_{14} .

Расчетная цепь круговых подач связывает шпиндель станка с револьверной головкой. Для этой цепи РП имеют вид:

$$1 \text{ оборот шпинделя} \rightarrow s_{\text{кр.}} \text{ мм перемещения револьверной головки } (P_3).$$

Минимальная круговая подача:

$$s_{\text{кр.1}} = 1 \cdot \frac{30}{26} \cdot \frac{27}{38} \cdot \frac{27}{27} \cdot \frac{18}{58} (M_{10}) \cdot \frac{19}{62} \cdot \frac{21}{75} (M_6) \cdot \frac{16}{32} \cdot \frac{32}{44} \cdot \frac{36}{36} (M_{13}) \cdot \frac{1}{33} \cdot \frac{19}{152} \cdot 2\pi \cdot 100 = 0,02 \text{ мм/об.}$$

Максимальная круговая подача:

$$s_{\text{кр.12}} = 1 \cdot \frac{30}{26} \cdot \frac{27}{38} \cdot \frac{27}{27} \cdot \frac{28}{48} (M_8) \cdot \frac{42}{39} \cdot \frac{63}{33} (M_7) \cdot \frac{16}{32} \cdot \frac{32}{44} \cdot \frac{36}{36} (M_{13}) \cdot \frac{1}{33} \cdot \frac{19}{152} \cdot 2\pi \cdot 100 = 0,8 \text{ мм/об.}$$

В приведенных формулах 100 – расстояние от оси поворота револьверной головки до осей гнезд для инструментов, равное R .

При работе станка частоту вращения шпинделя и подачу можно изменять вручную с помощью переключателей. Автоматическое переключение режимов обработки при смене позиций револьверной головки осуществляется через зубчатую передачу $50/50$, связанную с коллектором управления $KУ$, а на штекерной панели пульта управления программируются режимы обработки для каждой позиции головки. Длину пути суппорта устанавливают в соответствующих позициях револьверной головки, посредством регулируемых упоров на барабане B .

Для нарезания наружной и внутренней резьбы резцами или гребенками в структуре станка предусмотрено также резьбонарезная (винторезная) группа $\Phi_1(B_1P_4)$. Ее внутренняя связь:

$$(B_1) \text{ шпиндель } Ш \rightarrow 40/40 \rightarrow 33/33 \text{ или } 22/44 \rightarrow \text{копир } K \rightarrow \\ \text{резьбовая гайка} \rightarrow \text{штанга } V111 \rightarrow \text{державка инструмента } И (P_4).$$

Внешняя связь совпадает с внешней связью группы $\Phi_1(B_1)$, т.е. представляет собой кинематическую (структурную) цепь, связывающую электродвигатель со звеном соединения связей – шпинделем.

Группа настраивается на траекторию, путь и направление сменными комплектами копира K , резьбовой гайкой и блоком зубчатых колес $33-22$. Причем при включении передачи $33/33$ шаг нарезаемой резьбы равен шагу резьбы копира, а при включении передачи $22/44$ – вдвое меньше.

При нарезании резьбы инструмент $И$ закрепляют в державке, связанной со штангой $VIII$. Штангу поворачивают рукояткой $P4$, подводя инструмент к заготовке и вводя резьбовую гайку на левом конце штанги в зацепление с резьбовым копиром K . Копир получает вращение от шпинделя через передачу $40/40$ и блок зубчатых колес $33-22$. При этом резьбовая гайка со штангой $VIII$ и инструментом $И$ движется вдоль оси.

Заключение. Предложена парадигма познания металлорежущих станков, соответствующая двум постулатам теоретической механики: принципу разветвления энергии движения в механических цепях и принципу возможных перемещений, или принципу Даламбера. Первый из этих принципов раскрывает физическую сущность функционирования кинематики станков, второй – методику настройки станков. Рассмотрена методология

парадигмы познания, включающая три логически связанные части: основы теории формообразования реальных поверхностей при формообразующей обработке, функциональное проектирование кинематической структуры станочного оборудования по функции, задаваемой соответствующим способом формообразующей обработки, и анализ обобщенных структурных и кинематических схем станков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bertalanffy L. *Ogólna teoria systemów*. – Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1984. – 339 st.
2. Хакен Г. Синергетика / пер. с англ. канд. физ.-мат. наук В.И. Емельянова; под ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. Ю.Л. Климонтовича и д-ра физ.-мат. наук С.М. Осовца. – М.: Мир, 1980. – 405 с.
3. Колесников А.А. Шанс для рывка // Поиск. – 2002. – № 42(700). – С. 8.
4. Голембиевский А.И. Системология способов формообразующей обработки в машиностроении. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2017. – 236 с.
5. Федотенок А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков. – Изд. второе. – М.: Машиностроение, 1970. – 403 с.
6. Голембиевский А.И. Эволюция парадигмы познания металлорежущих станков. – Саарбрюккен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. – 156 с.
7. Металлорежущие станки: учеб.: в 2 т. / В.В. Бушуев, А.В. Еремин, А.А. Какоило и др.; под ред. В.В. Бушуева. – М.: Машиностроение, 2011. – Т. 2. – 586 с.
8. Ефремов В.Д., Горохов В.А., Схиртладзе А.Г. Металлорежущие станки / под общ. ред. П.И. Ящерицына. – Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 695 с.

REFERENCES

1. Bertalanffy, L. (1984). *Ogólna teoria systemów*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe. (in Polish)
2. Khaken, G., Klimontovich, Yu.L. (Eds.) & Osovets, S.M. (Eds.) (1980). *Sinergetika. [Synergetics]*. Moscow: Mir. (In Russ.)
3. Kolesnikov, A.A. (2002). Shans dlya ryvka. *Poisk*, 42(700), 8. (In Russ.)
4. Golembievskii, A.I. (2017). *Sistemologiya sposobov formoobrazuyushchei obrabotki v mashinostroenii*. – Novopolotsk: Polotskii gosudarstvennyi universitet. (In Russ.)
5. Fedotenok, A.A. (1970). *Kinematicheskaya struktura metallovezhushchikh stankov*. Moscow: Mashinostroenie. (In Russ.)
6. Golembievskii, A.I. (2019). *Evolutsiya paradigmy poznaniya metallovezhushchikh stankov*. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing. (In Russ.)
7. Bushuev, V.V., Eremin, A.V., Kakoilo, A.A., Makarov, V.M., Meshcheryakov, Yu.V., Molodtsov, V.V., ... Bushuev, V.V. (Eds.) (2011). *Metallovezhushchie stanki: v 2 t. T. 2*. Moscow: Mashinostroenie. (In Russ.)
8. Efremov, V.D., Gorokhov, V.A., Skhirtladze, A.G. & Yashcheritsyn, P.I. (Eds.) (2015). *Metallovezhushchie stanki*. Staryi Oskol: TNT. (In Russ.)

Поступила 14.04.2023

THE MODERN PARADIGM OF KNOWLEDGE OF METAL-CUTTING MACHINES

A. GOLEMBIEVSKY

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

A paradigm of cognition of metal-cutting machines in the logical and mathematical language of the general theory of systems is proposed. The methodology of creating and analyzing the kinematic structure of metal-cutting machines is considered. Fundamentals of the theory of shaping real surfaces in machine-building. The concept of classes of reproduction of real surfaces. Functional design of a particular kinematic structure of machine tools according to the function set by the method of formative processing. Generalization of particular structures into the generalized structure of a universal machine. The use of the cognition paradigm in the analysis of kinematic schemes of metal-cutting machines.

Keywords: *metal-cutting machines, paradigm of knowledge, methodology of the paradigm, method of shaping processing, functional design, particular and generalized kinematic structure of metal-cutting machines, analysis of the kinematic scheme of a known machine tool.*

УДК 621.774

DOI 10.52928/2070-1616-2023-48-2-13-21

ОТЖИГ ХОЛОДНОКАТАННЫХ ПОЛОС В АТМОСФЕРЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ

А.В. РАДИОНОВ, Н.В. ЗАКРЕВСКАЯ

(ООО «Металлопрокатная компания», Миоры)

канд. техн. наук, доц. С.В. ПИЛИПЕНКО, канд. техн. наук, доц. О.П. ШТЕМПЕЛЬ

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Представлены результаты моделирования процессов отжига нагартованных рулонов особо тонкой стальной полосы повышенного качества в защитных атмосферах водорода и азота в колпаковых печах. Приведен алгоритм расчета оптимального значения времени нагрева с учетом теплофизических свойств как обрабатываемых нагартованных рулонов особо тонкой стальной полосы, так и газов защитной атмосферы. Описана методика оптимизации режимов отжига нагартованных рулонов особо тонкой стальной полосы в колпаковой печи в среде чистого азота относительно базового режима в среде чистого водорода.

Ключевые слова: холодная прокатка, полоса, рулоны, защитная атмосфера, водород, азот.

Введение. Холодной прокаткой возможно производить тонкие и особо тонкие полосы повышенного качества из различных марок сталей и сплавов и с особыми свойствами металла^{1; 2} [1; 2]. Часть сортамента подвергается лужению и используется в пищевой промышленности, к такому металлу предъявляется дополнительный ряд требований. Процесс холодной прокатки сопровождается наклепом, поэтому металл подвергают отжигу. Чаще всего для этого используют колпаковые печи с защитной атмосферой. В качестве защитного газа применяют водород либо смесь азота и водорода. В большей мере используется водород. Технология отжига в атмосфере азота не до конца исследована, хотя и имеет ряд преимуществ.

Цель статьи – анализ технологических особенностей процесса отжига нагартованных рулонов из низкоуглеродистой стали 08пс в колпаковых печах с применением защитной атмосферы азота, выявление преимуществ и недостатков процесса, разработка алгоритма оптимизации значения времени нагрева рулонов полосовой стали в колпаковой печи с защитной атмосферой.

Основная часть. Методика проведения исследования. В работе использованы расчетно-аналитические методы на основе математического моделирования процессов нагрева металла в колпаковых печах с защитной атмосферой.

Анализ исследований. В колпаковой печи (рисунок 1) тепло к поверхности рулонов передается от муфеля (излучением) и защитного газа (конвекцией). Наружная поверхность муфеля нагревается от сгораемых газов (конвекцией) и кладки колпака (излучением).

Процесс теплообмена между газовой средой и поверхностью твердого тела, как правило, оценивают, рассматривая уравнение (закон теплоотдачи Ньютона)^{3; 4}

$$Q = \alpha \cdot F \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где Q – общее количество тепла в единицу времени; α – коэффициент теплоотдачи; F – площадь поверхности; Δt – перепад температур между газом и поверхностью.

Коэффициенты теплоотдачи определяют, пользуясь эмпирическими зависимостями (критерий Нуссельта)^{1; 2; 3} [2; 3]

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}, \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности среды; d – линейный размер твердого тела.

Если тело имеет один определяющий размер, то данная формула приобретает следующий вид^{1; 2; 3} [2; 3]:

$$Nu_m = C \cdot (Cr \cdot Pr)_m^n \cdot K, \quad (3)$$

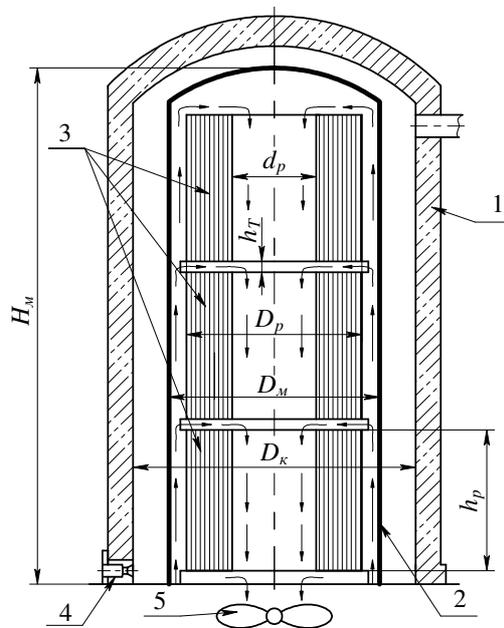
¹ Тымчак В.М., Гусовский В.Л. Расчет нагревательных и термических печей. Справочник. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.

² Уонг Х. Основные формулы и данные для по теплообмену для инженеров: справ. / пер. с англ. В.В. Яковлева и В.И. Колядина. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.

³ Овчинников С.В. Конвективный теплообмен, методики инженерного расчета коэффициента конвективной теплоотдачи [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие для студентов физ. фак. – Саратов: СГУ им. Н.Г. Чернышевского, 2015. URL: http://elibrary.sgu.ru/uch_lit/1483.pdf

⁴ Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. – М.: Металлургия, 1975. – 386 с.

где $Pr = \nu/a_{cp}$ – число Прандтля; ν – кинематическая вязкость среды; a_{cp} – коэффициент температуропроводности среды; $Cr = \frac{g \cdot \beta (T_s - T_{cp}) L^3}{\nu^2}$ – число Грасгофа; g – ускорение свободного падения; β – коэффициент объемного расширения среды; T_{cp} и T_s – средняя температура поверхности и температура среды соответственно; L – определяющий размер теплорассеивающей поверхности; m – индекс, указывающий, что значения физических параметров среды следует выбирать для температуры $T_m = \frac{T_s + T_{cp}}{2}$; K , C и n – коэффициенты.



1 – нагревательный колпак; 2 – муфель; 3 – рулоны; 4 – горелка; 5 – циркуляционный вентилятор;
 d_p и D_p – внешний и внутренний диаметр рулона; h_T – высота зазора между рулонами; D_k – диаметр колпака печи;
 D_m – диаметр муфеля⁵ [1–3]

Рисунок 1. – Схема колпаковой печи

При движении потока постоянной температуры вдоль плоской поверхности формула (3) может иметь вид^{5; 6; 7} [2; 3]:

$$Nu_d = C Re^n Gr_d^K, \quad (4)$$

где $Re = \frac{\omega d_s}{\nu} = \frac{\omega d_s \rho}{\mu}$ – число Рейнольдса; ω – скорость течения газа; d_s – характерный размер (эквивалентный диаметр), $d_s = \frac{4F}{U}$; U – периметр; F – площадь сечения; μ – динамическая вязкость.

Для различных условий и для различной формы нагреваемых тел выбирают определенные практикой значения коэффициентов K , C и n ^{5; 6; 7} [3].

Удельный тепловой поток к металлу в определенном сечении печи^{5; 7}

$$q = \sigma_{изл} \left[\left(\frac{T_{Г}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{П}}{100} \right)^4 \right], \quad (5)$$

где $\sigma_{изл}$ – приведенный коэффициент излучения; $T_{Г}$ и $T_{П}$ – температура газов и поверхности металла соответственно.

⁵ Тымчак В.М., Гусовский В.Л. Расчет нагревательных и термических печей. Справочник. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.

⁶ Уонг Х. Основные формулы и данные для теплообмена для инженеров: справ. / пер. с англ. В.В. Яковлева и В.И. Колядина. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.

⁷ Овчинников С.В. Конвективный теплообмен, методики инженерного расчета коэффициента конвективной теплоотдачи [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие для студентов физ. фак. – Саратов: СГУ им. Н.Г. Чернышевского, 2015. URL: http://elibrary.sgu.ru/uch_lit/1483.pdf

Тепловой поток вдоль пространства печи ($L_{печ}$) можно определить по следующей зависимости^{8; 9}:

$$q_{cp} = \frac{1}{L_{печ}} \int_0^{L_{печ}} q dL. \quad (6)$$

Коэффициент теплоотдачи в печи можно найти как^{8; 9}

$$\alpha_{т.о.} = \frac{q}{t_{Г} - t_{П}}, \quad (7)$$

где $F_{мет}$ – площадь металла.

Общее количество тепла, переданное металлу в единицу времени,

$$Q_{мет} = q_{cp} F_{мет}. \quad (8)$$

Коэффициент температуропроводности стали можно вычислить по формуле (при $C < 1,5\%$; $Mn < 0,5\%$; $Si < 0,5\%$) [3]

$$\lambda_{ст} = 1,163(60 - 8,7C - Mn - 29,0Si), \quad (9)$$

где C, Mn, Si – содержание элементов стали, %.

При этом, в зависимости от температуры, коэффициент температуропроводности принимает значения [3]: $\lambda_{ст.200} = 0,95\lambda_{ст.0}$; $\lambda_{ст.400} = 0,85\lambda_{ст.0}$; $\lambda_{ст.600} = 0,75\lambda_{ст.0}$; $\lambda_{ст.800} = 0,68\lambda_{ст.0}$; $\lambda_{ст.1000} = 0,68\lambda_{ст.0}$; $\lambda_{ст.1200} = 0,73\lambda_{ст.0}$.

Коэффициент температуропроводности вычисляется как

$$a = \frac{\lambda}{C_p \rho}, \quad (10)$$

где C_p – истинная теплоемкость; ρ – плотность стали.

При абсолютной прозрачности защитного газа приведенный коэффициент теплоотдачи излучением

$$C_{пр}^{нагр} = C_s \left[\frac{1}{\epsilon_m} + \frac{D_m}{D_p} \left(\frac{1}{\epsilon_p} - 1 \right) \right]^{-1}, \quad (11)$$

где ϵ_m – степень черноты муфеля; ϵ_p – степень черноты рулона.

Приведенный коэффициент излучения для системы газ–кладка–металл (при учете непрозрачности газов) определяют по формуле^{8; 9} [3]

$$C_{пр}^{нагр} = C_s \times \frac{\epsilon_{мет} \left(1 + \frac{F_{кл}}{F_{мет}} - \epsilon_{газ} \right)}{\left[\epsilon_{мет} + \epsilon_{газ} (1 - \epsilon_{мет}) \right] \frac{1 - \epsilon_{газ}}{\epsilon_{газ}} + \frac{F_{кл}}{F_{мет}}}, \quad (12)$$

где $\epsilon_{мет}$ – степень черноты металла; $\epsilon_{газ}$ – степень черноты газа; $F_{кл}$ – площадь кладки; $F_{мет}$ – площадь металла.

Коэффициент теплоотдачи излучением от муфеля к наружной боковой поверхности рулона^{8; 9}:

$$\alpha_{б}^{изл} = C_{пр}^{нагр} \times \frac{\left(\frac{t_{Г} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{б} + 273}{100} \right)^4}{t_{Г} - t_{б}}. \quad (13)$$

Площади поверхностей, м² [3]: боковой – $F_6 = \pi \times D_p \times h_p \times n_p$; торцевой – $F_{т} = \pi / 4 \times (D_p^2 - d_p^2) \times n_p$; внутренней – $F_{в} = \pi \times d_p \times h_p \times n_p$; муфеля – $F_m = \pi \times D_m \times H_m$.

Коэффициент приведения температуры газа к температуре муфеля^{8; 9}

$$\chi = \frac{k}{k+1}, \quad (14)$$

⁸ Тымчак В.М., Гусовский В.Л. Расчет нагревательных и термических печей. Справочник. – М.: Metallurgy, 1983. – 480 с.

⁹ Овчинников С.В. Конвективный теплообмен, методики инженерного расчета коэффициента конвективной теплоотдачи [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие для студентов физ. фак. – Саратов: СГУ им. Н.Г. Чернышевского, 2015. URL: http://elibrary.sgu.ru/uch_lit/1483.pdf

где k – коэффициент: $k = (\alpha_6 \times (F_M + 0,8F_6)) / (\alpha_T \times F_T + \alpha_B \times F_B)$; α_6 , α_T и α_B – средние приведенные коэффициенты теплоотдачи конвекцией к боковой, торцевой и внутренней поверхностям рулона; $\bar{\alpha}_6 = \alpha_6^{\text{вн}} + \chi \times \alpha_6$; $\bar{\alpha}_T = \chi \times \alpha_T$; $\bar{\alpha}_B = \chi \times \alpha_B$.

Расчет температурного поля в рулоне включает расчет эквивалентного коэффициента теплопроводности в радиальном направлении^{10; 11}

$$\lambda_3 = \left(1 - \frac{a}{100}\right) \left(\frac{1}{1-\eta} \lambda_T + \frac{1}{\eta} \alpha S\right) + \frac{a}{100} \lambda_M, \quad (15)$$

где η – коэффициент заполнения рулона металлом (отношение объема металла в рулоне к объему самого рулона) $\eta = 0,9 \dots 0,98$; a – степень контакта, %; α – коэффициент теплоотдачи через газовые прослойки; λ_T – коэффициент теплопроводности газов прослойки; λ_M – коэффициент теплопроводности металла; S – толщина металла.

Рассчитывают эквивалентный коэффициент теплопроводности

$$a_3 = \frac{2,6\lambda_3}{c_M \cdot \eta \cdot \rho_M}, \quad (16)$$

где c_M – теплоемкость металла; ρ_M – плотность металла садки.

Числа Био^{10; 11; 12}

$$Bi_1 = \frac{\bar{\alpha}_6 \times (D_p - d_p)}{2\lambda_r}; \quad Bi_2 = \frac{\bar{\alpha}_B \times (D_p - d_p)}{2\lambda_r}. \quad (17)$$

Относительное положение экстремальной точки в рулоне¹⁰:

$$r_{extr} = R_{нар} \sqrt{\frac{0,5 Bi_1 \left(\frac{R_{нар}}{R_{вн}} + 1\right) + \frac{R_{нар}}{R_{вн}} + \frac{Bi_1}{Bi_2}}{\frac{1}{R} + \frac{Bi_1}{Bi_2} + \frac{Bi_1 \ln \frac{R_{нар}}{R_{вн}}}{\frac{R_{нар}}{R_{вн}} - 1}}}, \quad (18)$$

где $R_{нар}$ – наружный радиус рулона; $R_{вн}$ – внутренний радиус рулона.

Коэффициент формы¹⁰

$$\phi_1 = \frac{\sqrt{0,5 \left(\left(\frac{D_p}{d_p}\right)^2 - 1\right) - \ln \frac{D_p}{d_p}}}{\frac{D_p}{d_p} - 1}. \quad (19)$$

Толщина рулона в направлениях¹⁰, м,

$$S_r = \phi_1 \times \mu \times \frac{(D_p - d_p)}{2}, \quad (20)$$

$$S_z = 0,5h_p, \quad (21)$$

где $\mu = (R_{нар} - r_{extr}) / (R_{нар} - R_{вн})$.

Коэффициенты теплопроводности в направлениях^{10; 11}, м²/ч,

$$a_r = \frac{3,6\lambda_r}{c_M \times \eta \times \rho_M}; \quad a_z = \frac{3,6\lambda_r}{c_M \times \rho_M}. \quad (22)$$

¹⁰ Тымчак В.М., Гусовский В.Л. Расчет нагревательных и термических печей. Справочник. – М.: Metallurgy, 1983. – 480 с.

¹¹ Овчинников С.В. Конвективный теплообмен, методики инженерного расчета коэффициента конвективной теплоотдачи [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие для студентов физ. фак. – Саратов: СГУ им. Н.Г. Чернышевского, 2015. URL: http://elibrary.sgu.ru/uch_lit/1483.pdf

¹² Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. – М.: Metallurgy, 1975. – 386 с.

Числа Био и Фурье в направлениях r и z рассчитываются по следующим формулам^{13; 14}:

$$Bi_r = \frac{\bar{\alpha}_6 \times S_r}{\lambda_r} \quad Fo_r = \frac{a_r \times \tau}{S_r^2}, \tag{23}$$

$$Bi_z = \frac{\bar{\alpha}_6 \times S_z}{\lambda_z} \quad Fo_z = \frac{a_z \times \tau}{S_z^2}, \tag{24}$$

где τ – время нагрева.

Из уравнения теплопроводности в критериальной форме^{13; 14; 15} [3]

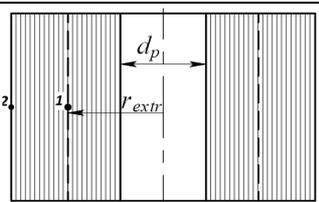
$$\theta = \frac{t_{\text{среды}} - t_{\text{точки}}}{t_{\text{среды}} - t_0} = f\left(\frac{x}{S}; Fo; Bi\right) \tag{25}$$

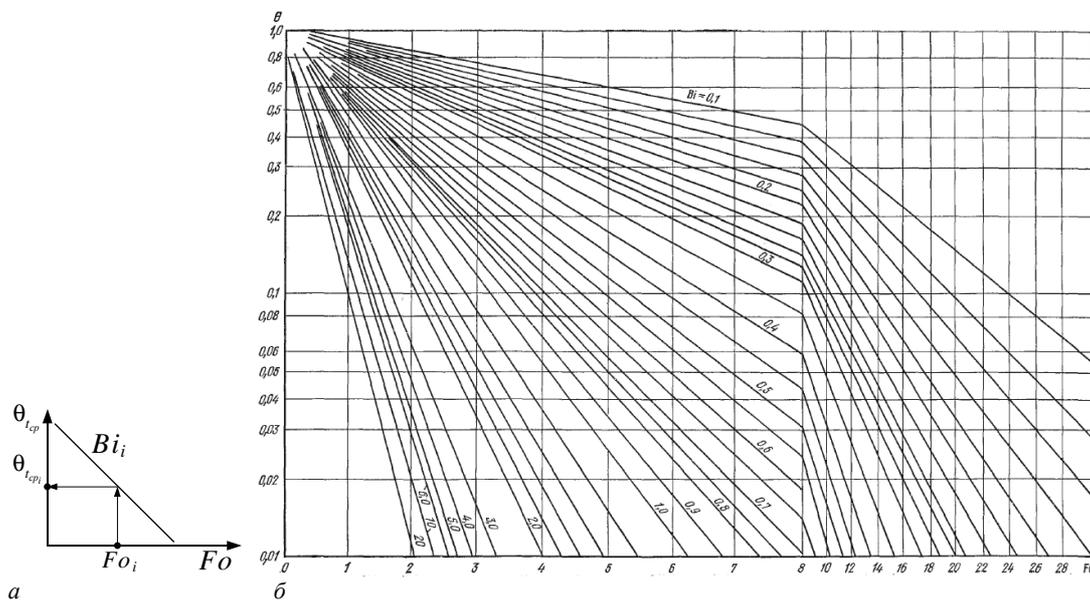
находим формулу расчета температуры рулона в нужной нам точке (таблица 1):

$$t_{\text{точки}} = t_{\text{среды}} - \theta(t_{\text{среды}} - t_0), \tag{26}$$

где S – половина толщины; x – координата сечения; t – температура точки с координатой x .

Таблица 1. – Выбор номера рисунка с номограммой определения значений температурных функций для разных точек рулона¹³

Эскиз	θ		$\theta_{t_{\text{cp}}}$ (номер рисунка)	Номер рисунка для определения θ для точки	
				1	2
	$\theta = \theta_r \times \theta_z$	θ_r	2	3	4
		θ_z		3	3



а – схема определения $\theta_{t_{\text{cp}}}$ при известных значениях Fo и Bi (здесь и далее, на рисунках 3 и 4);

б – номограмма определения $\theta_{t_{\text{cp}}}$

Рисунок 2. – Номограмма определения $\theta_{t_{\text{cp}}}$

¹³ Тымчак В.М., Гусовский В.Л. Расчет нагревательных и термических печей. Справочник. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.

¹⁴ Овчинников С.В. Конвективный теплообмен, методики инженерного расчета коэффициента конвективной теплоотдачи [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие для студентов физ. фак. – Саратов: СГУ им. Н.Г. Чернышевского, 2015. URL: http://elibrary.sgu.ru/uch_lit/1483.pdf

¹⁵ Уонг Х. Основные формулы и данные для по теплообмену для инженеров: справ. / пер. с англ. В.В. Яковлева и В.И. Колядина.– М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.

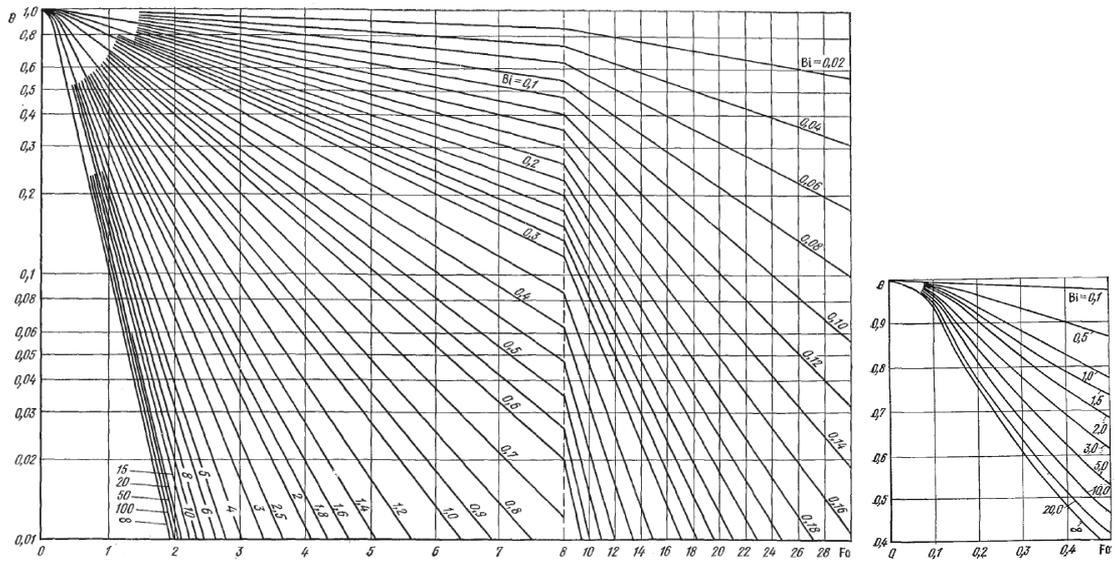


Рисунок 3. – Номограмма определения $\theta_{r,точ.1}$ и θ_Z ¹⁶

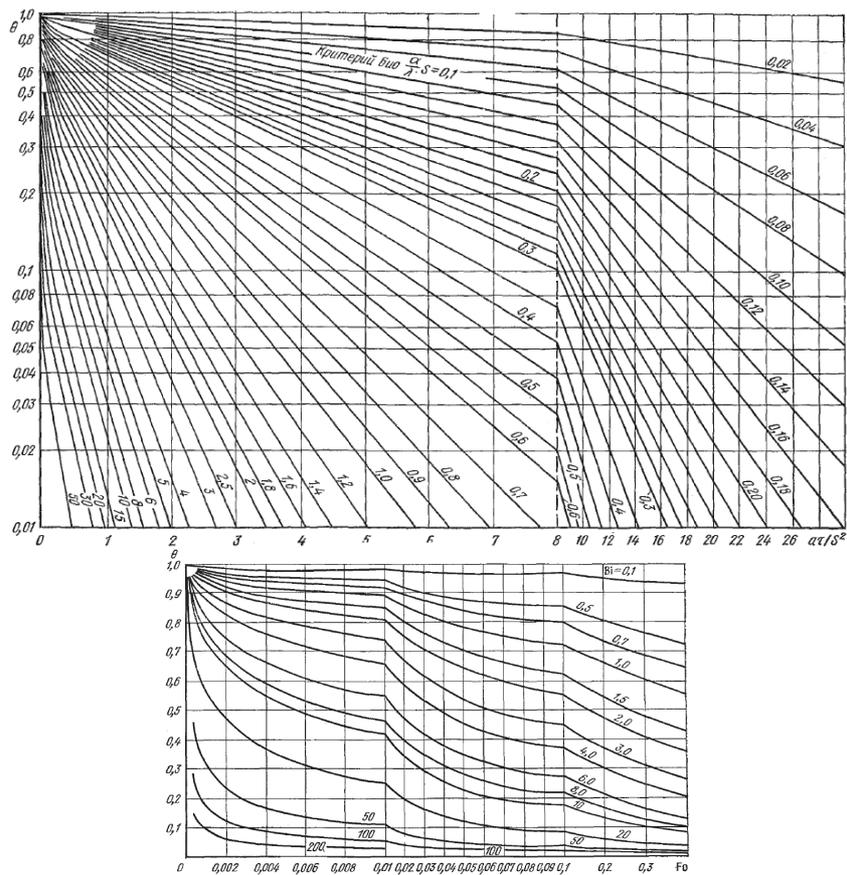


Рисунок 4. – Номограмма определения $\theta_{r,точ.2}$ ¹⁶

¹⁶ Тымчак В.М., Гусовский В.Л. Расчет нагревательных и термических печей. Справочник. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.

На рисунке 5 показана схема алгоритма расчета оптимального значения времени нагрева.

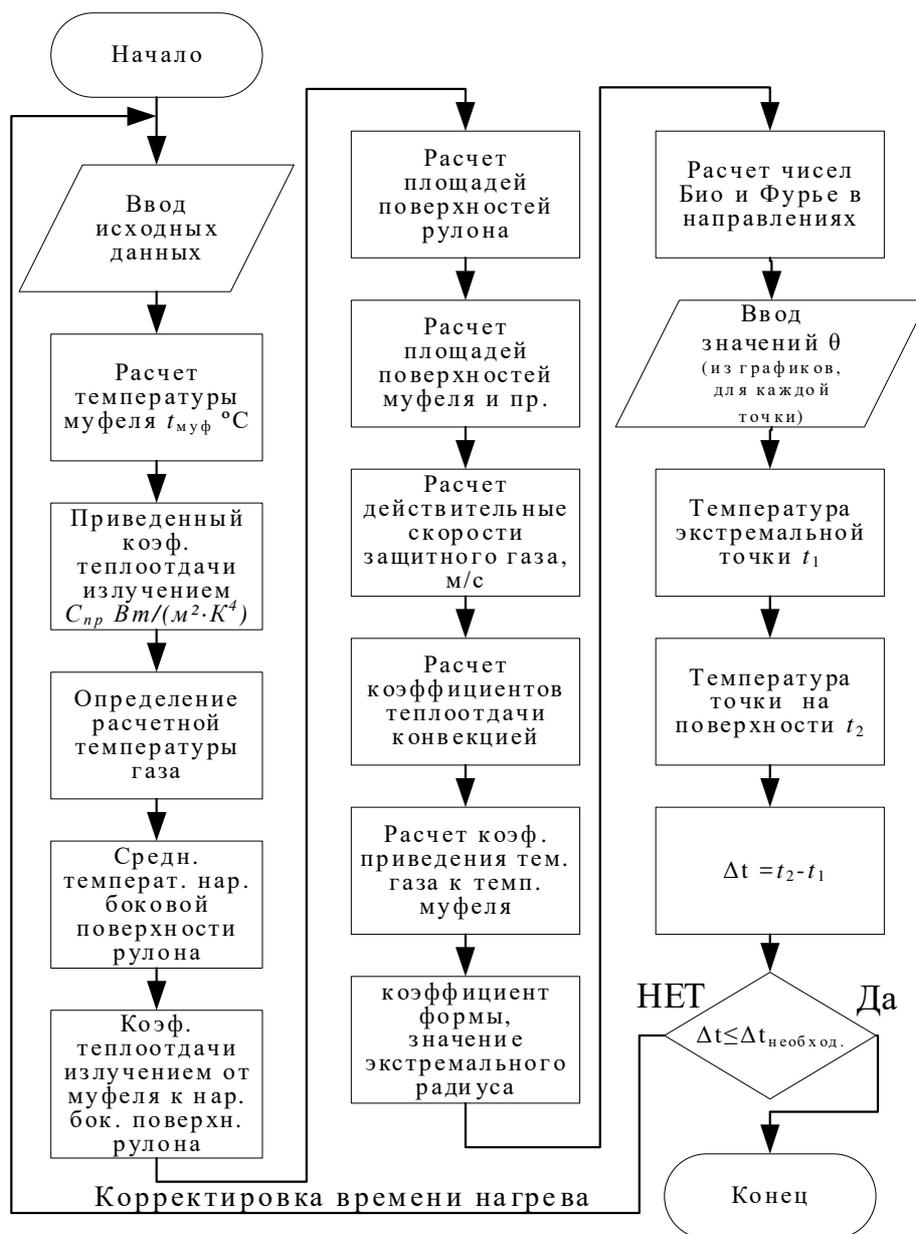


Рисунок 5. – Алгоритм оптимизации значения времени нагрева рулонов полосовой стали в колпаковой печи

Как видно из рисунка 5, в алгоритме имеется цикл, в котором оптимизируется значение времени нагрева до достижения минимального значения разницы температур между точкой 1 и точкой 2 (см. таблицу 1). Расчет усложняется тем, что значение функций θ определяется вручную по достаточно сложно интерполируемым графикам. Данный факт снижает точность расчетов.

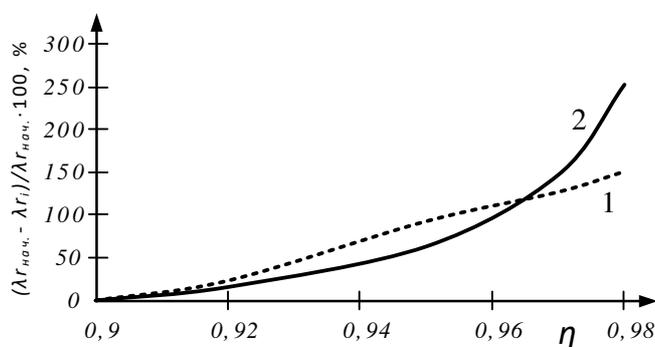
Рассматривая случай отжига в чистом азоте, следует отметить, что температура и теплопроводность азота принимают меньшие значения на всех рассматриваемых значениях температур, чем у водорода (см. таблицу 2). Данный факт говорит о сложности в достижении минимальной разницы температур по сечению рулона. Время нагрева и выдержки садки должно быть скорректировано в большую сторону. Исходя из этого, особое внимание следует уделить плотности намотки рулонов, т.к. этот параметр оказывает значительное влияние на средний коэффициент теплопроводности металла в радиальном направлении (λ_r , рисунок 6).

Согласно рисунку 6, чем выше значения плотности намотки, тем более высокие значения принимает и λ_r . Однако даже при увеличении степени коэффициента заполнения рулона металлом до максимальных значений, в случае отжига в среде азота λ_r принимает значительно меньшие значения, чем в случае применения водорода в качестве защитного газа. Из этого вытекает вопрос об увеличении времени выдержки садки (до достижения

оптимальной разницы температур между критическим сечением и точками на поверхности рулона). С увеличением времени нагрева возрастают и материальные затраты.

Таблица 2. – Физические параметры азота N_2 и водорода H_2 ($B = 1,01 \cdot 10^5$ Па)¹⁷

T, °C	N_2				H_2			
	Коэффициенты							
	теплопроводности $\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	вязкости		температуро- проводности $a \cdot 10^6$, м ² /с	теплопроводности $\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	вязкости		температуро- проводности $a \cdot 10^6$, м ² /с
динамиче- ской $\mu \cdot 10^6$, Па·с		кинематиче- ской $\nu \cdot 10^6$, м ² /с	динамиче- ской $\mu \cdot 10^6$, Па·с			кинематиче- ской $\nu \cdot 10^6$, м ² /с		
0	24,3	16,7	13,3	6,89	172	8,36	93	48,6
100	31,5	20,7	22,5	11,6	220	10,3	157	83,4
200	38,5	24,2	33,6	18,3	264	12,1	233	126
300	44,9	27,7	46,4	25,5	307	13,8	323	178
400	50,7	30,9	60,9	33,3	348	15,4	423	236
500	55,8	33,9	76,9	41,1	387	16,9	534	300
600	60,4	36,9	94,3	49,1	427	18,3	656	370



1 – водород; 2 – азот

Рисунок 6. – Зависимость изменения коэффициента теплопроводности рулона в радиальном направлении от коэффициента заполнения рулона металлом (200 °C)

Исходя из физических параметров азота, используя программу, написанную по алгоритму на рисунке 5, произведена корректировка времени нагрева садки рулонов полосы из стали TS 275 ($S = 0,184$ мм) для случая отжига в атмосфере чистого азота. За базовый режим отжига был принят режим отжига в среде 100% водорода в условиях ООО «Металлопрокатная компания». При расчетах определено, что в большей мере корректировке подвергается термин нагрева рулонов в интервалах более низких температур до 500 °C (время нагрева величечно). С повышением температур влияние среды азота на оптимальный термин нагрева рулонов (по сравнению с нагревом в среде водорода) становится не таким явным, и термин нагрева рулонов в этом промежутке температур практически не изменяется. Увеличение коэффициента заполнения рулона металлом позволяет уменьшить разность температур в критическом сечении и на поверхности рулона с меньшими затратами времени (и ресурсов).

Закключение. Анализ технологических особенностей процесса отжига в колпаковых печах с применением в качестве защитных газов водорода и азота показал, что применение в качестве защитного газа чистого азота сопряжено с рядом сложностей, связанных, главным образом, с тем, что температура и теплопроводность азота принимают меньшие значения во всем диапазоне температуры отжига, чем у водорода. Для их преодоления приходится идти на увеличение времени нагрева на каждом интервале температур, переходить на более плотную намотку рулонов.

Приведена методика оптимизации значения времени нагрева рулонов в колпаковой печи, согласно которой время нагрева корректируется в соответствии с разницей коэффициента теплопроводности в радиальном направлении с базовым режимом нагрева в среде чистого водорода.

¹⁷ Овчинников С.В. Конвективный теплообмен, методики инженерного расчета коэффициента конвективной теплоотдачи [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие для студентов физ. фак. – Саратов: СГУ им. Н.Г. Чернышевского, 2015. URL: http://elibrary.sgu.ru/uch_lit/1483.pdf

В соответствии с предложенной методикой оптимизации значения времени нагрева рулонов в колпаковой печи проведена корректировка технологических параметров нагрева рулонов при замене защитного газа с водорода на азот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мазур В.Л., Тимошенко В.И., Приходько И.Ю. Влияние режимов отжига в колпаковых печах на напряженно-деформированное состояние рулонов холоднокатаной стали // *Сталь*. – 2021. – № 9. – С. 22–29.
2. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
3. Аверин С.И., Гольдфарб Э.М., Кравцов А.Ф. Расчеты нагревательных печей / под ред. Н.Ю. Тайнца. – Киев: Металлургия, 1969. – 560 с.

REFERENCES

1. Mazur, V.L., Timoshenko, V.I. & Prikhod'ko, I.Yu. (2021). Vliyanie rezhimov otzhiga v kolpakovykh pechakh na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie rulonov kholodnokatanoi stali [Influence of annealing modes in bell-type furnaces on the stress-strain state of cold-rolled steel coils]. *Stal' [Steel]*, (9), 22–29. (In Russ., abstr. in Engl.)
2. Mikheev, M.A. & Mikheeva, I.M. (1977). *Osnovy teploperedachi*. Moscow: Energiya. (In Russ.)
3. Averin, S.I., Gol'dfarb, E.M. & Kravtsov, A.F. (1969). Pod red. N.Yu. Taints. *Raschety nagrevatel'nykh pechei*. Kiev: Metallurgiya. (In Russ.)

Поступила 18.04.2023

ANNEALING OF COLD-ROLLED STRIPS IN SHIELDING GAS ATMOSPHERE

A. RADIONOV, N. ZAKREVSAYA
(LLC “Metal Rolling Company”, Miory)
S. PILIPENKO, O. SHTEMPEL'

(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The results of modeling the processes of annealing cold-worked coils of extra-thin steel strip of high quality in protective atmospheres of hydrogen and nitrogen in bell-type furnaces are presented. An algorithm for calculating the optimal value of the heating time is given, taking into account the thermophysical properties of both processed hard-worked coils of extra-thin steel strip and protective atmosphere gases. A technique for optimizing the modes of annealing of hard-worked coils of extra-thin steel strip in a bell-type furnace in a pure nitrogen environment relative to the basic mode in a pure hydrogen environment is presented.

Keywords: cold rolling, strip, coils, protective atmosphere, hydrogen, nitrogen.

**ВЫЯВЛЕНИЕ ОПАСНЫХ СОСТОЯНИЙ И КОНТРОЛЬ РАЗРУШЕНИЯ
В СТАЛЬНЫХ РАСТЯНУТЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ТЕПЛОВЫМ МЕТОДОМ**

*д-р техн. наук, доц. Е.А. МОЙСЕЙЧИК¹, канд. техн. наук А.Е. МОЙСЕЙЧИК²,
А.А. ЯКОВЛЕВ¹*

¹(Белорусский национальный технический университет, Минск)

²(ЗАО «Струнные технологии», Минск)

Рассматриваются особенности образования тепла, основные возможности и области эффективного применения пассивного метода теплового неразрушающего контроля стальных элементов и изделий. Сформулированы основные требования к аппаратуре пассивного теплового контроля. Излагается механизм теплообразования в стали и обоснована структура формулы изменения ее температуры при деформировании. Показано, что диагностирование стальных элементов в пассивном режиме должно производиться при функционировании в них тепловых источников, возникающих в результате силовых воздействий на конструкции. Рассматриваются особенности определения напряженного состояния в стальных элементах пассивным тепловым методом. Отмечено, что пассивный метод теплового неразрушающего контроля стальных конструкций, нагружаемых непрерывно возрастающими или убывающими во времени силами, под действием которых в потенциально опасных зонах элементов функционируют внутренние деформационные источники тепла и поверхностные температурные поля, позволяет по кинетике и аномалиям температурных полей осуществлять контроль работоспособности в упругой, упругоэластической стадиях работы стали, зарождения и развития разрушения. Мощность тепловых деформационных источников, места их возникновения и кинетика развития зависят от условий силового нагружения, внешних температурных воздействий, материала и конструктивной формы элементов.

Ключевые слова: *стальные элементы, деформационное теплообразование, температура поверхности, пассивный тепловой контроль, техническое диагностирование.*

Введение. Надежное функционирование современных технических систем, устройств и технологий обеспечивается работоспособностью инженерных сооружений, машин и механизмов, ответственные элементы которых выполняются из конструкционной стали. В стальных конструктивно-технологических формах в процессе изготовления и эксплуатации возникают дефекты, поля напряжений и деформаций. При работе несущих элементов в их опасных зонах, слабых звеньях достигаются предельные состояния, превышение которых приводит к трещинообразованию в материале элементов, их возможному разрушению и возникновению аварийной ситуации. Опасные зоны конструкций и характерные параметры стали в предельном состоянии ответственных растянутых стальных элементов должны находиться под периодическим или непрерывным неразрушающим контролем. Существующие методы неразрушающего контроля часто нельзя применить из-за непригодности конструктивных форм к проведению контроля, неопределенности расположения опасных зон, отсутствия прямой зависимости между измеряемым физическим параметром и расчетной характеристикой работоспособности, незнания фактического напряженно-деформированного состояния (НДС) материала в контролируемых зонах, недостоверного выбора вспомогательного, определяющего и аварийного параметров контроля.

До недавнего времени тепловая энергия пластических деформаций не рассматривалась в качестве предвестника предельного состояния и разрушения в элементах из-за недостаточной изученности закономерностей теплообразования при деформировании стали на опасных участках элементов, узлов, соединений. Сегодня тепловые пассивные методы применяются для первичной диагностики стальных несущих элементов, контроля напряженного и деформированного состояний [1], выявления зон пластических деформаций в нагруженных образцах, зарождения и развития в них трещин^{1; 2; 3}. Тепловой пассивный контроль применяется при определении остаточного ресурса конструкций⁴. Имеются примеры его использования в технологии изготовления стальных изделий^{3; 4}

¹ Базалесв М.І. Розробка фізико-технологічних основ термографічного контролю і моніторингу стану матеріалів для оцінки ресурсу устаткування і споруджень ядерної енергетики методами інфрачервоної радіометрії: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.07 / Ін-т електрофізики і радіаційних технологій НАНУ. – Харків, 2015. – 36 с.

² Galietti U., Palumbo D. Application of thermal methods for characterization of steel welded joints [Electronic resource] // 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography / Québec, Canada (July 2–30, 2010). – URL: <http://https://www.ndt.net/article/qirt2010/papers/qirt2010-044.pdf> (дата обращения: 25.08.2018).

³ Nobuaki Nagatomo, Hidetoshi Sakamoto, Yoshifumi Ohbuchi. Macroscopic evaluation of plastic deformation by thermography method [Electronic resource] // 9th International Conference on Fracture & Strength of Solids / Jeju, Korea (June 9–13, 2013). – URL: <http://https://www.ndt.net/article/qirt2010/papers/qirt2010-044.pdf> (дата обращения: 25.08.2018).

⁴ Применение теплового контроля в экспертизе промышленной безопасности плавильной печи / Е.В. Абрамова, Н.А. Быстрова, В.К. Белкин и др. // Докл. XX Всерос. конф. по неразрушающему контролю и техн. диагностике / Москва (3–6 марта 2014 г.). – М.: Спектр. – С. 206–209.

[2; 3]. В статье [3] на основании анализа современных методов и средств неразрушающего контроля сварных соединений, выполненных контактной точечной сваркой (капиллярных, оптических, вихретоковых, магнитных, электрических, тепловых, радиационных, акустических), отмечается, что недостатки каждого из перечисленных методов не позволяют гарантировать надежное выявление дефекта. По мнению авторов [3], перспективным направлением неразрушающего контроля является развитие и использование бесконтактных методов, а тепловые методы могут применяться как для контроля сварных соединений, так и для управления технологическим процессом сварки. На основе инфракрасных термографических измерений возможно управление параметрами сварки⁵. Его эффективность возрастает при совместном использовании тепловых методов и численного моделирования⁵. Решение задач технической диагностики стальных несущих систем предполагает выполнение анализа и оценку напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов и всей системы, а также кинетики его изменения с учетом имеющихся дефектов и повреждений [4; 5]. Существенным недостатком большинства методов неразрушающего контроля является то, что; 1) при испытаниях производятся измерения качественных параметров, не имеющих прямой связи с напряженно-деформированным состоянием; 2) такие испытания позволяют обнаружить дефект или проследить процесс зарождения и разрушения в элементе, но они не дают возможности определения прочности элементов, разрушающих нагрузок, срока службы, остаточного ресурса, управления технологическими и прочностными процессами.

Цель настоящей статьи – рассмотрение области эффективного применения, особенностей образования тепла и основных возможностей пассивного метода теплового неразрушающего контроля стальных элементов и изделий на основании экспериментальных исследований авторов.

Основная часть. *Современные требования к методам неразрушающего контроля работоспособности и безопасности конструкций, оборудования и машин.* Дефекты, возникающие в процессе изготовления и испытаний конструкций, их эксплуатации и ремонтов, оцениваются по существующим нормативным документам, методикам неразрушающего контроля, регламентирующим допустимость и параметры тех или иных несовершенств. По [6], «стандартная процедура дефектоскопического контроля достаточно сложна и, как правило, не охватывает объект полностью». И «актуальность рассматриваемой проблемы возрастает с увеличением срока эксплуатации, что диктует необходимость поиска более простых и эффективных методов решения задачи оценки состояния материалов, эксплуатируемых или подвергающихся испытаниям конструкций» [6]. В работах [7; 8] на основе анализа существующих подходов к оценке остаточного ресурса названы новые тенденции в методах контроля работоспособности и безопасности стареющего оборудования. Отмечается [7], что при определении остаточного ресурса необходимо, во-первых, учитывать индивидуальные особенности конкретного изделия «на основе комплексного подхода, сочетающего результаты разрушающего и неразрушающего контроля с поверочными расчетами на прочность»; во-вторых, «заметна тенденция перехода от дефектоскопии к методам технической диагностики, основанным на сочетании механики разрушений, металловедения и НК»; в-третьих, появилась «необходимость 100%-ного обследования стареющего оборудования с целью определения потенциально опасных зон». В статье [7] на основе краткого анализа существующих методик поверочного расчета конструкций на прочность, возможностей и недостатков традиционных методов неразрушающего контроля напряжений делается вывод о необходимости «перехода от традиционной дефектоскопии к технической диагностике с использованием принципиально других методов контроля и подходов», включающих определение параметров дефектов, НДС, определение фактических структурно-механических характеристик металла. Согласно авторам [7; 8], оценить «фактическое НДС конструкции» могут «только “пассивные” методы диагностики». Переход от традиционных технологий неразрушающего контроля к технологиям технической диагностики конструкций и сооружений предполагает наличие теории, методов и средств определения технического состояния объектов [8; 9]. Определение технического состояния объектов может производиться последовательным решением трех задач: контроль технического состояния; поиск места и определение причин отказа (неисправности); прогнозирование технического состояния. Наиболее сложной и ответственной является третья задача, решение которой определяет техническое состояние объекта с заданной вероятностью на предстоящий интервал времени⁶ [10]. Задача прогнозирования технического состояния объекта с заданной вероятностью на предстоящий интервал времени до настоящего времени не получила полного решения. В работе [11] констатируется, что диагностика и продление срока службы стальных конструкций зданий и сооружений представляет собой сложную проблему, имеющую в настоящее время лишь частные решения. Важной составляющей технической диагностики элементов стальных конструкций является определение их реального НДС [12; 13]. А это предполагает, что техническое диагностирование объекта следует выполнять при нагрузках, равных рабочим или близким к ним.

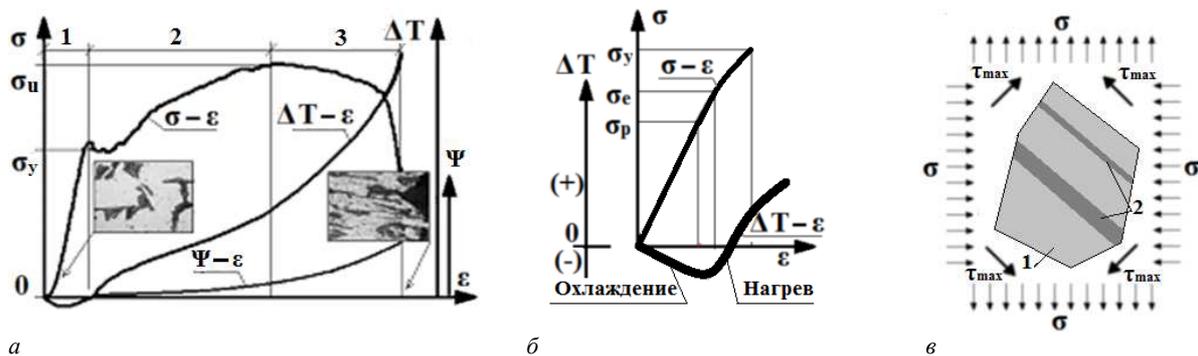
Деформационное тепло и техническое диагностирование стальных конструкций. Первоначально тепловые методы применялись в военных технологиях. С развитием теории, приборного, нормативного и организационного обеспечения теплового неразрушающего контроля получили дальнейшее развитие активные и пассивные тепловые методы в гражданских технологиях [14]. *Активные тепловые методы* применяются

⁵ Al-Karawi Janan, Schmidt Jürgen. Application of Infrared Thermography to the Analysis of Welding processes [Electronic resource]. – URL.: qirt.org/archives/qirt2004/papers/077.pdf (дата обращения: 7.08.2018).

⁶ ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2009. – 10 с.

в тех случаях, когда в объекте контроля не возникают внутренние тепловые источники. Активация тепловой энергии в контролируемом объеме производится за счет внешних воздействий [14; 15]. Работоспособность стальных элементов при возрастающей или убывающей во времени квазистатической, переменной или динамической нагрузке и при возникновении в них внутренних тепловых источников исследуют *пассивными тепловыми методами*^{7; 8} [1; 2; 16]. На основе пассивного теплового контроля прогнозируют напряженное состояние элементов с использованием вытекающей из теории У. Томсона линейной зависимости между мгновенными изменениями температуры тела и напряжениями упругого деформирования [17]. Теория У. Томсона не позволяет прогнозировать поведение конструкционной стали при ее работе в предельной и запредельных стадиях, характеризующихся возникновением пластических деформаций, зарождением и развитием трещин.

Процесс теплообразования в стали (рисунок 1) изменяется от ее охлаждения (стадия 1) до заметного нагрева при появлении пластических деформаций (стадии 2, 3).



а – диаграммы растяжения (σ - ϵ), нагрева (ΔT - ϵ) и развития повреждаемости (ψ - ϵ);
б – нагрев-охлаждение при упругом деформировании (участок 1);
в – участок стержня с зонами упругого охлаждения (1) и нагрева в полосе сдвига (2)

Рисунок 1. – Взаимосвязь между диаграммами растяжения, теплообразования, повреждаемости (*а, б*) и зоны охлаждения (1) и нагрева (2) контролируемого объема стального изделия

При этом изменяется макроструктура стали, растет повреждаемость ψ (см. рисунок 1, *а*), в материале происходят экзотермические твердотельные физико-химические реакции, инициированные процессом деформирования [16–21]. При упругом деформировании (стадия 1) происходит охлаждение стали (не больше 1 °С). При этом линейная зависимость ΔT - ϵ наблюдается при напряжениях σ , меньших предела пропорциональности σ_p . Выше σ_p начинаются отклонения от линейной зависимости, увеличивающиеся при напряжениях в стали, превышающих предел упругости σ_e (см. рисунок 1, *б*). Параллельно в выделенном объеме материала увеличивается число линий скольжения, в которых развиваются пластические деформации (см. рисунок 1, *в*). При напряжениях, превышающих предел текучести σ_y , линии скольжения заполняют весь выделенный объем. Работа пластического деформирования превращается в тепло и инициирует экзотермические физико-химические реакции в деформированном слое. Поэтому при деформировании выделенного объема (см. рисунок 1, *в*) его средняя температура (ΔT_d) будет зависеть от стадии деформирования. Если допустить, что доля пластически деформированного материала в выделенном объеме в текущий момент времени равна n , а упруго деформированного $(1 - n)$, то ΔT_d определится по выражению

$$\Delta T_d = (1 - n)\Delta T_e + n(\Delta T_p + \Delta T_r), \quad (1)$$

где ΔT_e , ΔT_p , ΔT_r – соответственно, изменение температуры выделенного объема за счет упругой, пластической деформаций и экзотермических твердотельных физико-химических реакций.

В первом приближении можно принять $n = 1$ (при $\sigma \geq \sigma_y$) и $n = 0$ (при $\sigma < \sigma_y$).

Внутренние источники тепловой стимуляции могут действовать непрерывно или в отдельные периоды функционирования объектов пассивного теплового контроля. Наиболее часто сооружения испытывают временные воздействия и нагрузки в периоды пуска-наладки, испытаний, кратковременных технологических циклов. В такие периоды работы сооружений в элементах происходит диссипация энергии, возникающей при функ-

⁷ Базалесев М.І. Розробка фізико-технологічних основ термографічного контролю і моніторингу стану матеріалів для оцінки ресурсу устаткування і споруджень ядерної енергетики методами інфрачервоної радіометрії: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.07 / Ін-т електрофізики і радіаційних технологій НАНУ. – Харків, 2015. – 36 с.

⁸ Применение теплового контроля в экспертизе промышленной безопасности плавильной печи / Е.В. Абрамова, Н.А. Быстрова, В.К. Белкин и др. // Докл. XX Всерос. конф. по неразрушающему контролю и техн. диагностике / Москва (3–6 марта 2014 г.). – М.: Спектр. – С. 206–209.

ционировании объекта контроля, в тепловую, а содержащиеся в объекте контроля дефекты становятся активными, выделяют или поглощают тепловую энергию, и их можно диагностировать в пассивном режиме. Отсюда следует, что диагностирование объекта контроля в пассивном режиме производится при иницировании в нем тепловых источников в результате технологического функционирования и поэтому на него затрачивается меньше ресурсов, чем при активном режиме.

Определение напряжений в стальных элементах пассивным тепловым методом. Взаимосвязь между изменением напряженного состояния контролируемого малого элемента и его температуры ΔT впервые установил У. Томсон в 1857 г. [17]. Запишем эту зависимость в виде

$$\Delta T = -\frac{T_\alpha}{c_p \rho} \Delta(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3), \quad (2)$$

где T – абсолютная температура элемента, К;
 α – коэффициент теплового расширения стали;
 c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении;
 ρ – плотность стали;
 $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ – главные напряжения.

Вид формулы (2) можно изменить с использованием понятия первого инварианта тензора напряженного состояния I_1 и обозначения $K_m = -\frac{\alpha}{c_p \rho}$:

$$\Delta T = -\frac{\alpha}{c_p \rho} \cdot T \cdot \Delta I_1 = -K_m \cdot T \cdot \Delta I_1. \quad (3)$$

Величину ΔI_1 представим в виде

$$\Delta I_1 = \Delta(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \Delta\sigma_1 \left(1 + \frac{\Delta\sigma_2}{\Delta\sigma_1} + \frac{\Delta\sigma_3}{\Delta\sigma_1} \right) = \Delta\sigma_1 (1 + K_{21} + K_{31}). \quad (4)$$

Численно $K_{21} \leq 1, K_{31} \leq 1$. При одноосном напряженном состоянии $\Delta I_1 = \Delta\sigma_1$. Упругое растяжение-сжатие однородного, изотропного шара для элемента в центре шара дает $(1 + K_{21} + K_{31}) = 3$. Для других ситуаций $1 < (1 + K_{21} + K_{31}) < 3$. Отмеченная неопределенность не имеет места только при $K_{21} + K_{31} = 0$. Для других конкретных ситуаций сумму $(K_{21} + K_{31})$ можно определять на основании конечно-элементного расчета изделия. Коэффициент K_m определяется расчетом или экспериментально для конкретной марки стали и соответствующего температурного диапазона. Для температур от 223 до 373 К величины K_m для низкоуглеродистых марок сталей $K_m = (3,086 - 3,407)10^{-6}$ мм²/Н и его можно принимать по данным [22]. Например, если температура поверхности статически растягиваемого элемента из стали 22 К изменится на $\Delta T = 0,1$ К, то это будет соответствовать при $T = 293$ К изменению напряжений $\Delta\sigma_1 = 110,6$ Па. Расчет показал, что при определении напряжений по температурному полю поверхности высокие требования предъявляются к приборам измерения температуры и соответствующему программному обеспечению.

Проверка формулы У. Томсона тремя способами (по данным термографии, тензометрированием при упругой работе материала и на основании конечно-элементного анализа) позволила автору работы⁹ сделать вывод, что тепловой и конечно-элементный методы дают близкие результаты и применимы при работе стали вплоть до разрушения, а тензометрический метод – только при упругой работе.

Кинетика температурных полей деформируемых конструктивно-технологических форм. Экспериментально установлено [23], что разрушение и деформация металлов и сплавов сопровождаются инфракрасным излучением и частичным излучением в видимом диапазоне. Это позволяет контролировать НДС, предельные состояния элементов, зарождение и развитие разрушения в них методом инфракрасной термографии [14; 16]. При этом чувствительность используемых для контроля камер к перепаду температур должна быть не ниже 0,05 °С. Деформационное теплообразование в стали определяется многими факторами (материалом и стадией его работы, объемом очага деформации, скоростью деформирования, видом конструктивно-технологической формы, напряженным состоянием, распределением остаточных напряжений, влиянием внешней среды и др.). Температура на поверхности квазистатически деформируемых стальных элементов конструкций может пони-

⁹ Horvath L. Experimentelle Untersuchungen der im Stahlbau typischen Bauteile mit Thermovision. Dissertation zu Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs. – Cottbus: BTU, 2002. – 84 s.

жаться на (0,2–1,0) °С и повышаться на 70 °С и более. На разных стадиях разрушения возникают различные свечения. При ударном нагружении на копре МК-30 локальный разогрев в деформируемых зонах достигает сотен градусов (800–1 000 °С для сплава ВТ 8 и 100 °С для У8); при малых скоростях нагружения вспышки температуры составляют (25–52) °С [24].

Визуализация температурных полей деформируемых растяжением элементов с конструктивными дефектами позволяет не только контролировать НДС, возникновение предельных состояний и зарождение разрушения, но и выделить новые закономерности в механизме зарождения и развития трещин в конструктивных элементах [20]. Термофильмы деформирования образцов показали, что в упругой стадии по направлению наибольших касательных напряжений в материале элементов зарождаются полосы сдвига (рисунок 2).

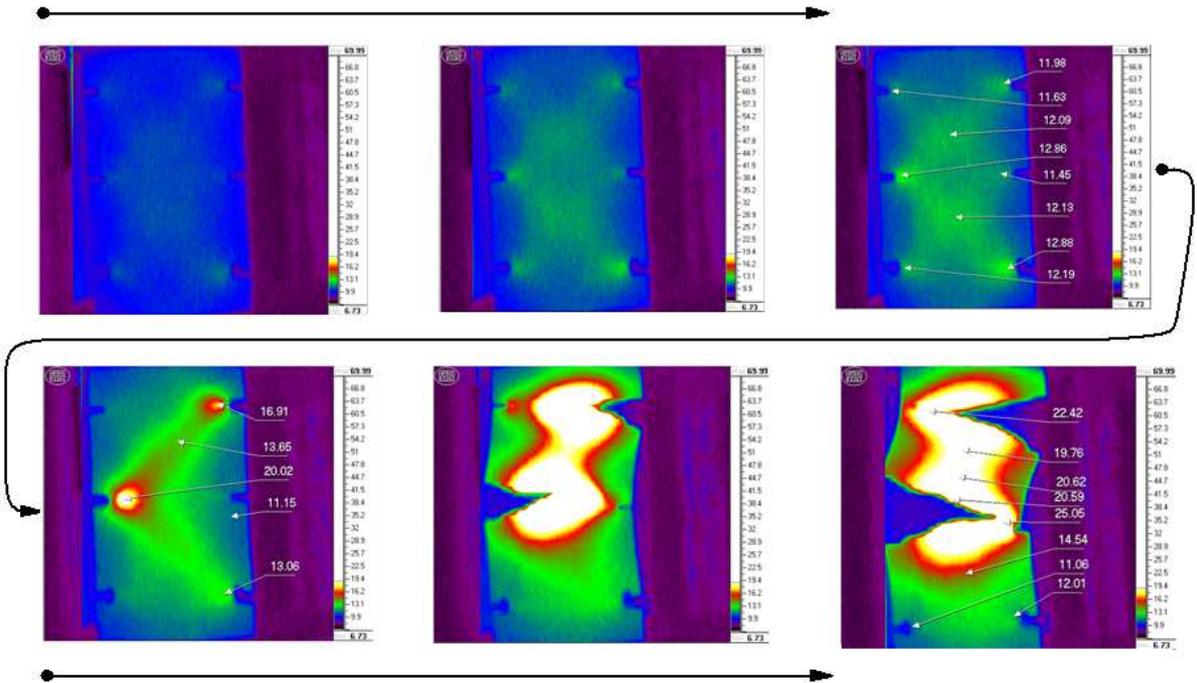
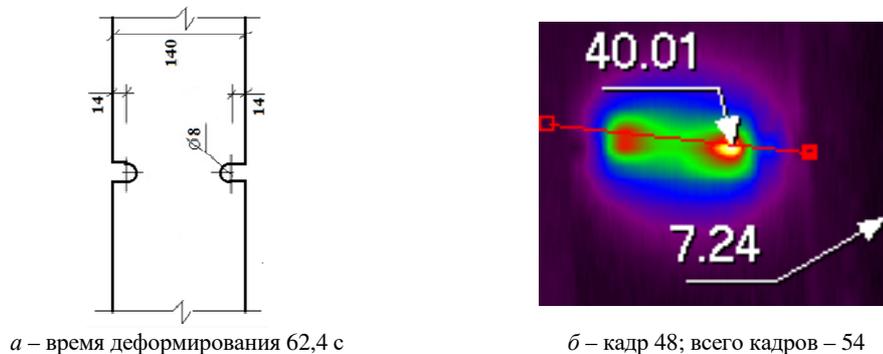


Рисунок 2. – Кадры термофильма квазистатического растяжения до разрушения листового элемента толщиной 18 мм с боковыми вырезами

Зарождение трещин в полосах сдвига сопровождалось аномальным возрастанием температуры стали в корне надрезов до (22–25) °С. Полосы сдвига при деформировании разделяли образец на блоки, размеры и форма которых определялись конструктивной формой. В опасных зонах растянутых образцов зарождались трещины как скола, так и отрыва, развитие которых приводило к вязкому, вязкохрупкому или хрупкому излому. Реализация конкретного механизма излома определялась напряженным состоянием зоны, в которой зарождалась начальная трещина [20; 22]. Кинетика изменения температуры в опасном сечении образца с двусторонними вырезами и в выделенной опасной точке показана на рисунке 3.



а – время деформирования 62,4 с

б – кадр 48; всего кадров – 54

Рисунок 3. – Схема образца с боковыми вырезами, температурное поле поверхности для кадра № 48 и графики изменения температуры по выделенному направлению (z) и в выделенной точке (40.01) за период нагружения (t) (начало)

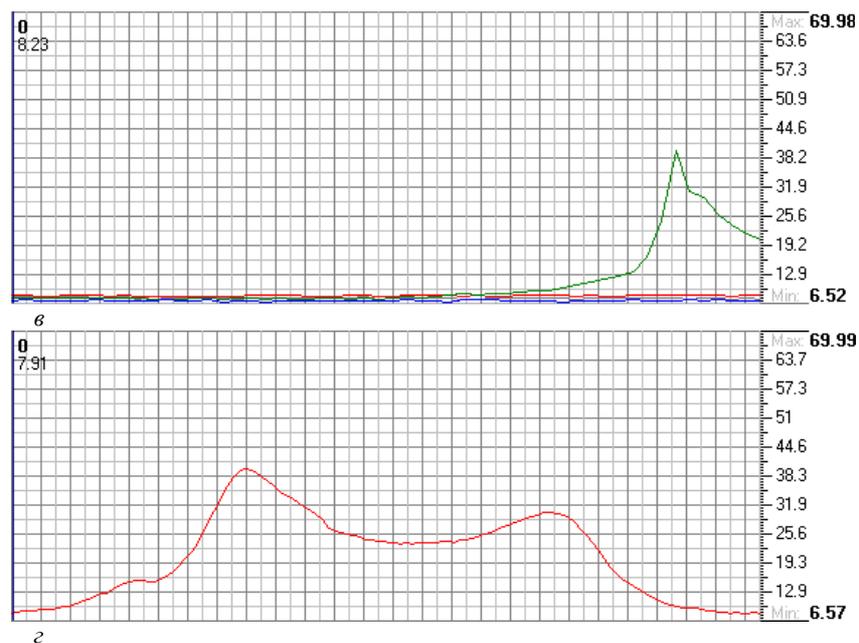


Рисунок 3. – Схема образца с боковыми вырезами, температурное поле поверхности для кадра № 48 и графики изменения температуры по выделенному направлению (г) и в выделенной точке (40.01) за период нагружения (б) (окончание, начало – с. 26)

Образец разрушился по выделенному сечению квазихрупко. Температура в основании надреза (очаге зарождения разрушения) повышалась до 40,01 °С при температуре окружающего воздуха 7,24 °С (см. рисунок 3, б). Изменение температуры вдоль выделенной линии отображено на графике рисунка 3, г. Пики температуры наблюдаются в основании боковых надрезов.

Заключение. Выполненный нами комплекс теоретических и экспериментальных работ доказывает, что пассивный метод теплового неразрушающего контроля стальных конструкций, нагружаемых непрерывно возрастающими или убывающими во времени силами, под действием которых в потенциально опасных зонах элементов функционируют внутренние деформационные источники тепла и поверхностные температурные поля, позволяет по кинетике и аномалиям температурных полей осуществлять контроль работоспособности в упругой, упругопластической стадиях работы стали, зарождения и развития разрушения. Мощность тепловых деформационных источников, места их возникновения и кинетика развития зависят от условий силового нагружения, внешних температурных воздействий, материала и конструктивной формы элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пустовой В.Н. Металлоконструкции грузоподъемных машин. Разрушение и прогнозирование остаточного ресурса. – М.: Транспорт, 1992. – 256 с.
2. Тепловой неразрушающий контроль изделий / О.Н. Будагин, А.И. Потапов, В.И. Колганов и др. – М.: Наука, 2002. – 472 с.
3. Современные методы и средства неразрушающего контроля сварного соединения, выполненного контактной точечной сваркой (обзор) / Е.В. Шаповалов, Р.М. Галаган, Ф.С. Клишар и др. // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – 2013. – № 1. – С. 10–22.
4. Прочностной мониторинг мостовых сооружений и особенности его применения. Часть 1. Международный и отечественный опыт применения мониторинга / И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, О.И. Нигаматова и др. // Транспортные сооружения. – 2014. – Т. 1, № 1. – С.1–32. DOI: 10.15862/01TS114
5. Богданов Е.А. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования. – М.: Высш. шк., 2006. – 279 с.
6. Интеллектуальные технологии в оценке состояния конструкций (АЭ технология и контролирующая аппаратура нового поколения на ее основе) / Б.Е. Патон, Л.М. Лобанов, А.Я. Недосека и др. // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – 2016. – № 2. – С. 3–18. DOI: 10.15407/tdnk2016.02.01
7. Дубов А.А. Проблемы оценки остаточного ресурса стареющего оборудования // Безопасность труда в промышленности. – 2003. – № 3. – С. 46–49.
8. Ерёмин К.И., Матвеюшкин С.А. Особенности экспертизы и НК металлических конструкций эксплуатируемых сооружений // В мире НК. – 2008. – № 4(42). – С. 4–7.
9. Комаровский А.А. Диагностика напряженно-деформированного состояния // Контроль. Диагностика. – 2000. – № 2. – С. 22–27.
10. Венгринович В.Л. Мониторинг технического состояния в проблеме обеспечения техногенной безопасности. Обратная задача // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2014. – № 1. – С. 57–81.

11. Фомина И.П., Голоднов А.И. Обоснование продления срока эксплуатации стальных балок // 36. наук. праць Україн. ін-ту сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського. – 2013. – В. 11. – С. 140–147.
12. Голоднов А.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния – составная часть работ по продлению ресурса строительных конструкций сооружений // Вісн. Придніпр. держ. акад. будів. та арх. – 2004. – № 7-8. – С. 34–40.
13. Коновалов Н.Н. Нормирование дефектов и достоверность неразрушающего контроля сварных соединений. – М.: ГУП НТЦ ПБ, 2004. – 132 с.
14. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – 2-е изд. – М.: Спектр, 2013. – 575 с.
15. Тепловой контроль авиационных конструкций / А.В. Ковалев, В.И. Матвеев, В.В. Кошкин [и др. // MEGATECH. – 2011. – № 2-3. – С. 16–22.
16. Maldague X. Theory and Practice of Infrared Technology for NonDestructive Testing. – New York: John Wiley-Interscience, 2001. – 684 p.
17. Thomson W. On the Thermoelastic and Thermomagnetic Properties of Matter // Quart. J. of Math. – 1857. – 1. – P. 57–77.
18. Мойсейчик Е.А. Тепловой контроль материалов, стальных конструкций и машин. – Минск: Ковчег, 2022. – 200 с.
19. Мойсейчик Е.А. Распределение углерода и механизм теплообразования при холодном деформировании образцов из низкоуглеродистой стали // Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та. – 2010. – № 5. – С. 22–26.
20. Мойсейчик Е.А. Исследование теплообразования и зарождения разрушения в стальной растянутой пластине с конструктивно-технологическим дефектом // Приклад. механика и техн. физика. – 2013. – № 1. – С. 134–142.
21. Василевич Ю.В., Мойсейчик А.Е. Закономерности деформирования образцов типа Людвика-Шея и образцов с групповыми выточками // Теорет. и приклад. механика. – Вып. 31. – 2016. – С. 238–241.
22. Moysyichik E.A., Vavilov V.P., Kuimova M.V. Nondestructive testing of steel and constructions by using the phenomenon of deformation heat release // Journal of Nondestructive Evaluation. – 2018. – 37(2). – [28]. DOI: 10.1007/s10921-018-0482-4
23. Эмиссионные процессы, сопровождающие деформирование и разрушение металлов / К.Б. Абрамова, И.П. Щербakov, А.И. Русаков и др. // Физика твердого тела. – 1999. – Т. 41, вып. 5. – С. 842–843.
24. Малыгин Г.А. Локальные разогревы в кристаллах при низкотемпературной деформации // Физика твердого тела. – 1977. – Т. 19, вып. 10. – С. 3152–3155.

REFERENCES

1. Pustovoi, V.N. (1992). *Metallokonstruktii gruzopod"emnykh mashin. Razrushenie i prognozirovanie ostatochnogo resursa*. Moscow: Transport. (In Russ.)
2. Budadin, O.N., Potapov, A.I., Kolganov, V.I., Troitskii-Markov, T.E. & Abramova, E.V. (2002). *Teplovoi nerazrushayushchii kontrol' izdelii*. Moscow: Nauka. (In Russ.)
3. Shapovalov, E.V., Galagan, R.M., Klishchar, F.S. & Zapara, V.I. (2013). Sovremennyye metody i sredstva nerazrushayushchego kontrolya svarnogo soedineniya, vypolnennogo kontaktnoi tochechnoi svarkoi (obzor) [Modern methods and means of non-destructive testing of a welded joint made by contact spot welding (review)]. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchii kontrol' [Technical diagnostics and non-destructive testing]*, (1), 10–22. (In Russ., abstr. in Engl.)
4. Ovchinnikov, I.G., Ovchinnikov, I.I., Nigmatova, O.I. & Mikhaldykin, E.S. (2014). Prochnostnoi monitoring mostovykh sooruzhenii i osobennosti ego primeneniya. Chast' 1. Mezhdunarodnyi i oteche-stvennyi opyt primeneniya monitoringa [Strength monitoring of bridge structures and features of its application. Part 1. International and domestic experience in the use of monitoring]. *Transportnye sooruzheniya [Transport facilities]*, 1(1), 1–32. DOI: 10.15862/01TS114 (In Russ., abstr. in Engl.)
5. Bogdanov, E.A. (2006). *Osnovy tekhnicheskoi diagnostiki neftegazovogo oborudovaniya*. Moscow: Vysshaya shkola. (In Russ.)
6. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Ovsienko, M.A., Yaremenko, M.A., ... Kushnirenko, S.A. (2016). Intellektual'nye tekhnologii v otsenke sostoyaniya konstruktivnykh (AE tekhnologiya i kontroliruyushchaya apparatura novogo pokoleniya na ee osnove) [Intelligent technologies in assessing the state of structures (AE technology and new generation control equipment based on it)]. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchii kontrol' [Technical diagnostics and non-destructive testing]*, (2), 3–18. DOI: 10.15407/tdnk2016.02.01 (In Russ., abstr. in Engl.)
7. Dubov, A.A. (2003). Problemy otsenki ostatochnogo resursa stareyushchego oborudovaniya [Problems of assessing the residual life of aging equipment]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti [Labor safety in industry]*, (3), 46–49. (In Russ., abstr. in Engl.)
8. Eremin, K.I. & Matveyushkin, S.A. (2008). Osobennosti ekspertizy i NK metallicheskih konstruktivnykh ekspluatiruemyykh sooruzhenii [Peculiarities of examination and NDT of metal structures of operated facilities]. *V mire NK [In the world of NDT]*, 4(42), 4–7. (In Russ., abstr. in Engl.)
9. Komarovskii, A.A. (2000). Diagnostika napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya [Diagnostics of the stress-strain state]. *Kontrol'. Diagnostika [Control. Diagnostics]*, (2), 22–27. (In Russ., abstr. in Engl.)
10. Vengrinovich, V.L. (2014). Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya v probleme obespecheniya tekhnogennoi bezopasnosti. Obratnaya zadacha [Monitoring of the technical condition in the problem of ensuring technogenic safety. Inverse problem]. *Nerazrushayushchii kontrol' i diagnostika [Non-destructive testing and diagnostics]*, (1), 57–81. (In Russ., abstr. in Engl.)
11. Fomina, I.P. & Golodnov, A.I. (2013). Obosnovanie prodleniya sroka ekspluatatsii stal'nykh balok [Rationale for extending the service life of steel beams]. *Zbirnik naukovikh prats' Ukrain'skogo institutu stalevikh konstruktivnykh imeni V.M. Shimanovskogo [Collection of scientific practices of the Ukrainian Institute of Steel Structures named after V.M. Shimanovsky]*, (B11), 140–147. (In Russ., abstr. in Engl. and Ukrainian)
12. Golodnov, A.I. (2004). Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya – sostavnaya chast' rabot po prodleniyu resursa stroitel'nykh konstruktivnykh sooruzhenii [Modeling of the stress-strain state as an integral part of the work on extending the life of building structures]. *Visnik Pridniprovskoi derzhavnoi akademii budivnitsva ta arkhitekturi [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Life and Architecture]*, (7-8), 34–40. (In Russ., abstr. in Engl. and Ukrainian)

13. Kononov, N.N. (2004). *Normirovanie defektov i dostovernost' nerazrushayushchego kontrolya svarnykh soedinenii*. Moscow: GUP NTTs PB. (In Russ.)
14. Vavilov, V.P. (2013). *Infrakrasnaya termografiya i teplovoi kontrol'*. Moscow: Spektr. (In Russ.)
15. Kovalev, A.V., Matveev, V.I., Koshkin, V.V. & Khizhnyak, S.A. (2011). Teplovoi kontrol' aviatsionnykh konstruksii. *MEGATECH*, (2-3), 16–22. (In Russ.)
16. Maldague, X. (2001). *Theory and Practice of Infrared Technology for NonDestructive Testing*. New York: John Wiley-Interscience. (In Engl.)
17. Thomson, W. (1857). On the Thermoelastic and Thermomagnetic Properties of Matter. *Quart. J. of Math.*, (1), 57–77. (In Engl.)
18. Moiseichik, E.A. (2022). *Teplovoi kontrol' materialov, stal'nykh konstruksii i mashin*. Minsk: Kovcheg. (In Russ.)
19. Moiseichik, E.A. (2010). Raspredelenie ugleroda i mekhanizm teploobrazovaniya pri kholodnom deformirovanii obratsov iz nizkouglerodistoi stali [Distribution of carbon and the mechanism of heat generation during cold deformation of specimens from low-carbon steel]. *Vestnik Belorusskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universitetata [Bulletin of the Belarusian National Technical University]*, (5), 22–26. (In Russ., abstr. in Engl.)
20. Moiseichik, E.A. (2013). Issledovanie teploobrazovaniya i zarozhdeniya razrusheniya v stal'noi rastyanutoi plastine s konstruktivno-tekhnologicheskim defektom [Investigation of heat generation and fracture initiation in a stretched steel plate with a structural and technological defect]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika [Applied Mechanics and Technical Physics]*, (1), 134–142. (In Russ., abstr. in Engl.)
21. Vasilevich, Yu.V. & Moiseichik, A.E. (2016). Zakonomernosti deformirovaniya obratsov tipa Lyudvika-Sheya i obratsov s gruppovymi vytochkami [Patterns of deformation of specimens of the Ludwik-Shey type and specimens with group undercuts]. *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika [Theoretical and applied mechanics]*, (31), 238–241. (In Russ., abstr. in Engl.)
22. Moyseychik, E.A., Vavilov, V.P. & Kuimova, M.V. (2018). Nondestructive testing of steel and constructions by using the phenomenon of deformation heat release. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 37(2), [28]. DOI: 10.1007/s10921-018-0482-4 (In Engl.)
23. Abramova, K.B., Shcherbakov, I.P., Rusakov, A.I. & Semenov, A.A. (1999). Emissionnye protsessy, soprovozhdayushchie deformirovanie i razrushenie metallov [Emission processes accompanying the deformation and destruction of metals]. *Fizika tverdogo tela [Solid State Physics]*, 41(5), 842–843. (In Russ., abstr. in Engl.)
24. Malygin, G.A. (1977). Lokal'nye razogrevy v kristallakh pri nizkotemperaturnoi deformatsii [Local heating in crystals under low-temperature deformation]. *Fizika tverdogo tela [Solid State Physics]*, 19(10), 3152–3155. (In Russ., abstr. in Engl.)

Поступила 10.05.2023

DETECTION OF HAZARDOUS STATES AND FAULT CONTROL IN STRETCHED STEEL ELEMENTS BY THERMAL METHOD

**E. MOISEICHIK¹, A. MOISEICHIK²,
A. YAKOVLEV¹**

¹ (Belarusian National Technical University, Minsk)

² (Unitsky String Technologies Inc., Minsk)

The article discusses the areas of effective application, the features of heat generation and the main possibilities of the passive method of thermal non-destructive testing of steel elements and products. The basic requirements for passive thermal control equipment are formulated. The mechanism of heat generation in steel is described and the structure of the formula for changing its temperature during deformation is substantiated. It is shown that the diagnostics of steel elements in the passive mode should be carried out with the functioning of heat sources in them, arising as a result of force effects on structures. The features of determining the stress state in steel elements by the passive thermal method are considered.

It is shown that the passive method of thermal non-destructive testing of steel structures, loaded with continuously increasing or decreasing forces in time, under the influence of which internal deformation heat sources and surface temperature fields function in potentially dangerous zones of elements, makes it possible to control the operability in elastic, elastic-plastic stages of steel operation, the origin and development of destruction. The power of thermal deformation sources, the places of their occurrence and the kinetics of development depend on the conditions of force loading, external temperature influences, material and structural shape of the elements.

Keywords: steel elements; deformation heat generation; surface temperature; passive thermal control; technical diagnostics.

ТРАНСПОРТ

УДК 656

DOI 10.52928/2070-1616-2023-48-2-30-35

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТРАНСПОРТНЫХ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ И ПОТОКОВ

д-р техн. наук, доц. Д.В. КАПСКИЙ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)
В.В. КАСЬЯНИК

(Брестский государственный технический университет)
д-р техн. наук, доц. А.Г. БАХАНОВИЧ
(Министерство образования Республики Беларусь, Минск)
д-р техн. наук, проф. Г.М. КУХАРЕНКО
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассмотрены вопросы оценки и выявления заторовых и предзаторовых ситуаций на примере магистралей крупнейшего города, а также выявления мест изменения качества дорожного движения на различных участках улично-дорожной сети на основе модели Хермана–Пригожина.

Ключевые слова: *качество дорожного движения, моделирование, модель Хермана–Пригожина.*

Введение. Оценка качества дорожного движения была и остается одной из самых неразрешенных проблем. Дело в том, что совокупное качество дорожного движения определяется несколькими свойствами, в первую очередь аварийностью, экологичностью, экономичностью и социологичностью, оценивая степень соответствия дорожного движения своему назначению. Для оценки *аварийности* используются абсолютные, относительные, удельные и сравнительные показатели [1–4]. Оценка *экологичности* дорожного движения осуществляется по двум факторам: приведенному (к СО) объему выбросов вредных веществ в атмосферу и уровню эквивалентного транспортного шума. При оценке выбросов используется удельный (кг (СО)/км) объем выбросов, произведенный транспортным потоком, и объем выбросов, приведенный непосредственно к потребителю: водителям, пассажирам, пешеходам и жителям (посетителям) близлежащих зданий [4; 5]. В работе¹ оценку выбросов предлагается осуществлять отдельно по каждому (примерно 30) из веществ, что не позволяет выполнить ее из-за бесконечного множества возможных комбинаций. Оценка транспортного шума проводится, как правило, по его уровню, приведенному к потребителям [5]. Оценка экономичности дорожного движения выполняется по нескольким критериям, важнейшими из которых являются удельная (на один автомобиль) задержка и удельная остановка^{2; 3} [6–10 и др.]. Часто используются суммарные (для всего потока) значения этих показателей. Д. Дрю [9] предложил, пожалуй, самый универсальный на сегодня оценочный критерий качества дорожного движения – «уровень обслуживания» (LOS – Level of Service). Под уровнем обслуживания понимают качественное состояние транспортного потока, при котором устанавливаются характерные условия движения. Разработаны классификации уровней обслуживания для загородных дорог, городских улиц и пешеходного движения. Уровни обслуживания и методики их применения вошли во все издания американского руководства по регулированию – Highway Capacity Manual² (НСМ 1950, 1965, 1985, 2000 и др.), и постоянно совершенствуются. Одним из недостатков рассматриваемого критерия является его в целом качественная оценка и трудность, а иногда и невозможность количественной оценки эффективности отдельных решений. В [10] рекомендован оценочный критерий «уровень удобства движения», зависящий от нескольких факторов и очень напоминающий «уровень обслуживания». Приведена классификация уровней удобства, согласно которой транспортные потоки делятся на свободные, частично связанные, связанные и плотные (насыщенные). К сожалению, приведенная классификация недостаточно проработана, что делает проблематичным ее практическое использование.

¹ ТКП 17.08-03-2006(02120). Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ и парниковых газов в атмосферный воздух. Правила расчета выбросов механическими транспортными средствами в населенных пунктах = Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне. Атмасфера. Выкіды забруджвальных рэчываў і цяплічных газаў у атмасфернае паветра. Правілы разліку выкідаў механічнымі транспартнымі сродкамі ў населенных пунктах. – Минск: БелНИЦ «Экологія». – 18 с.

² Highway Capacity Manual / TRB. NRC. – Washington, 2000. – 1134 p. URL: https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/highway_capacital_manual.pdf

³ Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen / Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen. – Köln: FGSV, 2005. – 384 s.

Ю.А. Врубель [3] представил новый универсальный оценочный критерий – «потери в дорожном движении», под которыми понимается социально-экономическая стоимость *невынужденных* издержек процесса движения. Этот критерий применим для оценки качества как дорожного движения в целом, так и отдельных его свойств.

С появлением современных технологий определения местоположения, таких как GPS и Глонас, для решения задач оценки параметров ТП на магистралях и УДС началось более активное применение двухжидкостной модели ТП Хермана–Пригожина [11; 12]. В качестве основных характеристик ТП для расчетов с использованием двухжидкостной математической модели Хермана–Пригожина рассматриваются: интенсивность, объем движения, средняя скорость движения, время сообщения, коэффициент загрузки движением. С использованием данной модели определяются нелинейные зависимости между удельным временем в пути, затрачиваемым на единицу расстояния, и удельным временем задержек на единицу расстояния. Модель Хермана–Пригожина привлекательна для практического использования, поскольку по сравнению с другими моделями она легко применима при проведении регулярных обследований условий дорожного движения. Модель двух потоков представляет макроскопическое измерение качества функционирования дорожной сети.

Основная часть. *GPS-мониторинг транспорта* – одна из разновидностей систем спутникового мониторинга транспорта, основанная на использовании американских спутников GPS.

Принцип мониторинга заключается в отслеживании и анализе пространственных и временных координат транспортного средства. Существует два варианта мониторинга: «on-line» (с дистанционной передачей координатной информации) и «off-line» (информация считывается по прибытию на диспетчерский пункт). На транспортном средстве устанавливается мобильный модуль, состоящий из следующих частей: приемник спутниковых сигналов, модули хранения и передачи координатных данных. Программное обеспечение мобильного модуля получает координатные данные от приемника сигналов, записывает их в модуль хранения и по возможности передает посредством модуля передачи. Мобильный модуль может быть построен на основе приемников спутникового сигнала, работающих в стандартах NAVSTAR, GPS или ГЛОНАСС.

Сбор данных о характеристиках треков транспортных средств, получаемых с навигационного оборудования, может осуществляться двумя методами:

- пассивный эксперимент, при котором осуществляется сбор выборочных данных по совокупности случайных маршрутов движения автомобилей, располагающих бортовыми навигационными системами (GPS или ГЛОНАСС-оборудованием), с последующей привязкой треков к ГИС-карте города;

- активный эксперимент, при котором сбор данных осуществляется автомобилем-лабораторией на заранее выбранных маршрутах движения по УДС.

Методика пассивного эксперимента наряду с использованием модели Хермана–Пригожина позволяет оценить параметры транспортного потока и построить систему поддержки принятия решений для управления перевозками, выбором маршрутов движения и оценки возможных изменений в транспортной системе.

От качества организации дорожного движения зависят сегодня практически все сферы деятельности государства. Работа в области повышения качества организации дорожного движения начинается с оценки существующей ситуации на магистралях, улицах городов, поэтому разработка современных программных систем для оценки и анализа условий дорожного движения с использованием новых технологий достаточно актуальна.

Появление новых технологий распределенного сбора, хранения и обработки сверхбольших объемов данных, методологии Data Mining позволяют современным программным системам собирать и обрабатывать статистический материал, получая новые результаты, недоступные технологиям ранее. Применение таких программных систем к исследованиям существующей дорожной сети дает возможность лицам, принимающим решения, адекватно и количественно обосновывать свои решения. Это приводит к устранению проблем в узких местах дорожной сети, позволяет уменьшить удельную стоимость принятых мер, а также в режиме реального времени отслеживать изменения, происходящие в улично-дорожной сети.

Разработанная программная система предназначена в первую очередь для специалистов по оценке транспортных потоков, влияния условий дорожного движения на производительность всей сети, анализу возможностей наращивания или перераспределения транспортных потоков между магистральными линиями.

При выполнении данной работы для анализа использовались обезличенные данные о треках в формате csv, полученные с навигационного оборудования, установленного на транспортных средствах нескольких компаний (треки были предоставлены ОАО «АГАТ – системы управления» – управляющая компания холдинга «Геоинформационные системы управления»). Для их обработки был написан модуль, позволяющий обрабатывать большие объемы данных из предоставленных файлов. Эти данные содержат следующую информацию: дата, время, идентификатор автомобиля, широта, долгота, скорость.

Для каждого кластера приведена краткая характеристика дорожных условий, определенная на основании анализа показателей для других городов. Сравнения показатели различных городов, можно сделать вывод о характеристиках организации дорожного движения в г. Минске. Так, была определена степень влияния нагрузки транспортного потока на качество обслуживания. Кроме того, полученная кластеризация маршрутов была применена для отображения маршрутов на карте в различной цветовой дифференциации в зависимости

от класса маршрута. Это позволяет визуально выделить участки дорог с различными дорожными условиями. Результаты визуализации приведены на рисунке 1.

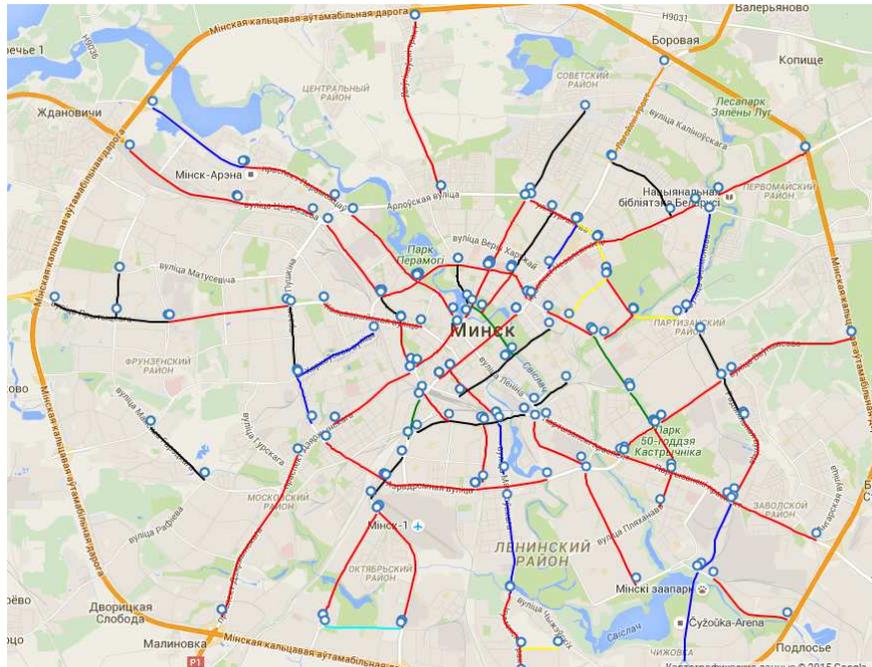


Рисунок 1. – Цветовая дифференциация маршрутов по классам

По нажатию на маршрут (начало или конец маршрута) есть возможность получить информацию о данном маршруте вместе с графиком в движении и остановках авто. Данная возможность продемонстрирована на рисунке 2.

На данном рисунке можно увидеть зависимость времени от номера трека. Синим цветом на рисунке изображено общее время движения каждого участника, зеленым – время в движении (без времени стояния). Таким образом, визуально можно определить адекватность треков по разрывам между общим временем и временем в движении.



Рисунок 2. – Краткая информация о маршруте

В результате тестирования подсистемы кластеризации была получена классификация улиц г. Минска по качеству организации дорожного движения, определены проблемные улицы и визуализированы результаты.

Важным применением полученной системы является оценка международных и республиканских транспортных коридоров. Данная система позволяет получить численные показатели качества обслуживания для магистралей. Эта информация может применяться для поддержки принятия решений по перераспределению транспортных потоков в пределах транспортных коридоров, анализу их нагрузки и возможностей обслуживания. Для тестирования данного функционала системы из набора треков был выбран участок магистрали М-1 Кобрин–Держинск (рисунок 3).

bysaferyindex: [Map](#) [Add street](#)

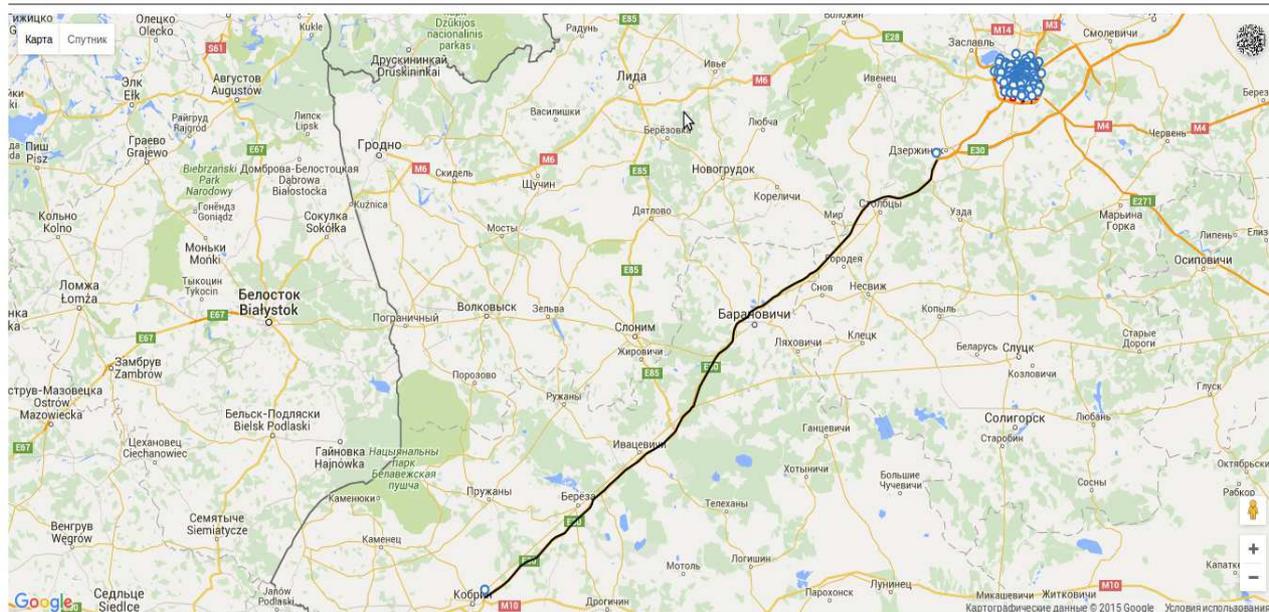


Рисунок 3. – Участок международной магистрали М-1, выбранный для анализа

Для данного участка трассы был произведен расчет параметров модели Хермана–Пригожина. Отчет по результатам параметров модели представлен на рисунке 4.

```

=====
Номер маршрута: 230
Адрес: Е30, Держинск–Кобрин, Беларусь
Начальная точка: [53.64997988644802, 27.07310199737549]
Конечная точка: [52.23320757003185, 24.430932998657227]
Расстояние по прямой: 236813 метра(ов)
Расстояние по дороге: 246949 метра(ов)
Скорость: 80.8 км/ч
=====
#   TT      RT      logTT      logRT      TT*TT      TT*RT      x-avg (x)      (x-avg (x) ) ^2
1   18686.014942.09.6605238737726   9.6119313185357   93.3257215157306   92.8562919757772   0.1298575119255   0.0168629734035
2   11637.011628.09.3619449561081   9.3611712616788   87.6460133611975   87.6387700765374   -0.1687214057390   0.0284669127546
3   14062.012944.09.6512314027591   9.4683876392983   91.2260213090517   90.4347613539618   0.0205650409120   0.0004229209077
4   13398.012620.09.5028607210682   9.4430381360952   90.3043618840211   89.7358761910483   -0.0278056407789   0.0007731536591
5   15686.014942.09.6605238737726   9.6119313185357   93.3257215157306   92.8562919757772   0.1298575119255   0.0168629734035
6   12669.012669.09.4469133436021   9.4469133436021   89.2441717215265   89.2441717215265   -0.0837530182451   0.0070145680652
=====

x - logTT      y - logRT

Подгоночные параметры для y=kx+b
k      =      0.822026497023356
b      =      1.656101885896788

Параметры модели Германа-Пригожина
n      =      4.618813942945377
Tmin   =      10996.456542833406274
Tmin_ud =      44.529261275945260

Статус: ОК
=====
    
```

Рисунок 4. – Отчет по результатам расчета параметров Хермана–Пригожина

Согласно отчету, данный участок имеет длину 246 км, средняя скорость транспортных средств на данном участке составляет 81 км/ч. Качество обслуживания для данного участка равно 4,61, что соответствует сильно-му влиянию интенсивности на качество обслуживания по ранее приведенной классификации. Таким образом, на данном участке магистрали при увеличении нагрузки средняя скорость движения будет сильно уменьшаться, а время проезда увеличиваться. В связи с исключительной важностью данной магистрали необходимо рассматривать варианты совершенствования инфраструктуры магистрали для уменьшения влияния нагрузки на качество обслуживания.

Заключение. В рамках данной работы была разработана программная система, включающая в себя модули сбора навигационных данных, хранения, верификации данных треков, управления данными улиц или дорог, расчета показателей модели Хермана–Пригожина и классификации улиц по данным параметрам. В результате тестирования программной системы были получены результаты, подтверждающие работоспособность разработанного программного обеспечения. Также в результате использования полученного инструмента к навигационным данным, собранным в Республике Беларусь, а именно для г. Минска, была продемонстрирована способность программной системы выделять классы улиц с различными условиями организации дорожного движения и влияния нагрузки транспортного потока на пропускную способность. Таким образом, данный инструмент может быть применен для анализа транспортных коридоров, основных магистралей и улиц города с целью нахождения участков первостепенной важности, которые требуют модернизации и усовершенствования.

Основным достоинством разработанной системы является возможность работы как с уже собранными навигационными данными, так и сбор параметров с использованием специально разработанного мобильного приложения для ОС Android. Использование для хранения больших объемов данных облачного хранилища, а для расчетов и обработки веб-приложения позволяет сделать систему веб-сервисом. Применение такого решения в структуре современных транспортных компаний и государственных органов даст возможность в перспективе улучшить механизм принятия решения в процессе выбора дорог для модернизации.

Дальнейшее развитие системы требует исследований в области повышения производительности подсистем обработки и хранения данных. Рост количества данных о треках положительно сказывается на увеличении статистической достоверности полученных данных, поэтому необходимо улучшить производительность с точки зрения увеличения объема обработанных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабков В.Ф. Дорожные условия и безопасность движения. – М.: Транспорт, 1982. – 288 с.
2. Капский Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2008. – 243 с.: вкл.
3. Врубель Ю.А. Потери в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2003. – 380 с.
4. Elvik R. Cost-benefit analysis of road safety measures: applicability and controversies // *Accident Analysis and Prevention*. – 2001. – Vol. 33(1). – P. 9–17. DOI: 10.1016/s0001-4575(00)00010-5
5. Врубель Ю.А., Капский Д.В., Кот Е.Н. Определение потерь в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2006. – 240 с.
6. Михайлов А.Ю., Головных И.М. Современные тенденции проектирования и реконструкции улично-дорожных сетей городов. – Новосибирск: Наука, 2004. – 267 с.
7. Врубель Ю.А. Организация дорожного движения: в 2 ч. – Минск: Белорус. фонд безопасности дорожного движения, 1996. – Ч. 1. – 328 с.
8. *Cost-Benefit Analysis: Concepts and Practice* / Anthony E. Boardman, David H. Greenberg, Aidan R. Vining et al. – 3rd ed. – New Jersey: Prentice Hall, 2005. – 560 p.
9. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими / пер. с англ. Е.Г. Коваленко и Г.Д. Шермана; под ред. Н.П. Бусленко. – М.: Транспорт, 1972. – 424 с.
10. Сильянов В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения. – М.: Транспорт, 1977. – 303 с.
11. Prigogine I., Herman R. *Kinetic theory of vehicular traffic*. – New York: Elsevier, 1971. – 100 p.
12. Herman R., Prigogine I. A Two-Fluid Approach to Town Traffic // *Science*. – 1979. – Vol. 204. – P. 148–151. DOI: 10.1126/science.204.4389.148

REFERENCES

1. Babkov, V.F. (1982). *Dorozhnye usloviya i bezopasnost' dvizheniya*. Moscow: Transport. (In Russ.)
2. Kapskii, D.V. (2008). *Prognozirovaniye aviariynosti v dorozhnom dvizhenii*. Minsk: BNTU. (In Russ.)
3. Vruble', Yu.A. (2003). *Poteri v dorozhnom dvizhenii*. Minsk: BNTU. (In Russ.)
4. Elvik, R. (2001). Cost-benefit analysis of road safety measures: applicability and controversies. *Accident Analysis and Prevention*, 33(1), 9–17. DOI: 10.1016/s0001-4575(00)00010-5 (In Engl.)
5. Vruble', Yu.A., Kapskii, D.V. & Kot, E.N. (2006). *Opredeleniye poter' v dorozhnom dvizhenii*. Minsk: BNTU. (In Russ.)
6. Mikhailov, A.Yu. & Golovnykh, I.M. (2004). *Sovremennyye tendentsii proektirovaniya i rekonstruktsii ulichno-dorozhnykh setei gorodov*. Novosibirsk: Nauka. (In Russ.)
7. Vruble', Yu.A. (1996). *Organizatsiya dorozhnogo dvizheniya: v 2 ch. Ch. 1*. Minsk: Belorusskii fond bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya. (In Russ.)

8. Boardman, Anthony E., Greenberg, David H., Vining, Aidan R. & Weimer, David L. (2005). *Cost-Benefit Analysis: Concepts and Practice*. New Jersey: Prentice Hall. (In Engl.)
9. Dryu, D. (1972). *Teoriya transportnykh potokov i upravlenie imi. [Theory of traffic flows and their management]*. Moscow: Transpopt. (In Russ.)
10. Sil'yanov, V.V. (1977). *Teoriya transportnykh potokov v proektirovanii dorog i organizatsii dvizheniya. –* Moscow: Transport. (In Russ.)
11. Prigogine, I. & Herman, R. (1971). *Kinetic theory of vehicular traffic*. New York: Elsevier. (In Engl.)
12. Herman, R. & Prigogine, I. (1979). A Two-Fluid Approach to Town Traffic. *Science*, (204), 148–151. DOI: 10.1126/science.204.4389.148 (In Engl.)

Поступила 16.08.2023

MATH MODELING TRANSPORT CORRESPONDENCE AND FLOWS

D. KAPSKII

(Belarusian National Technical University, Minsk)

V. KASYANIK

(Brest State Technical University)

A. BAKHANOVICH

(Ministry of Education of the Republic of Belarus, Minsk)

G. KUKHARENOK

(Belarusian National Technical University, Minsk)

The issues of assessing and identifying congestion and pre-congestion situations on the example of highways of the largest city, as well as identifying places of change in the quality of traffic in various sections of the road network based on the Herman–Prigozhin model, are considered.

Keywords: *traffic quality, modeling, Herman–Prigozhin model.*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ АУДИТА ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

д-р техн. наук, доц. Д.В. КАПСКИЙ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)
д-р техн. наук, доц. А.Г. БАХАНОВИЧ
(Министерство образования Республики Беларусь, Минск)
д-р техн. наук, проф. Г.М. КУХАРЕНКО
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассматриваются теоретические и практические вопросы проведения аудита организации дорожного движения на автомобильных дорогах и улицах Республики Беларусь. Предлагаемые подходы позволят повысить не только безопасность, но и качество дорожного движения – снизить все виды потерь в дорожном движении.

Ключевые слова: аудит, дорожный транспорт, организация движения, очаг аварийности.

Введение. Дорожный транспорт, оказывающий обществу до 70% всего объема транспортного обслуживания, представляет собой огромную социально-производственную систему. В эту систему входят такие подсистемы, как дороги, транспортные средства, автомобильные перевозки, подготовка кадров, организация дорожного движения и др. Дорожное движение, в котором непосредственно осуществляется транспортная услуга, функционально принадлежит подсистеме организации дорожного движения, цель которой – упорядочение процесса движения и повышение его качества. Целью остальных подсистем и звеньев системы дорожного транспорта является создание надлежащих условий для нормального функционирования процесса дорожного движения и минимизации последствий неизбежных издержек этого процесса.

Ежегодно в мире погибает более 1 млн человек и около 50 млн человек получают ранения и травмы^{1; 2; 3}. За последние шесть лет в Республике Беларусь произошло 554 521 аварий, в т.ч. с пострадавшими 41 914 аварии, в которых ранены 44 621 и погибли 8509 человек, а аварийные потери составили около 1,7 млрд долл. По данным статистики в авариях ежедневно гибнут около 4 человек и около 18 получают ранения^{4; 5; 6; 7}. В Российской Федерации ежегодно происходит около 200 тыс. аварий с пострадавшими, в которых гибнут более 26 тыс. человек и более 250 тыс. получают ранения. Российские ученые проводят исследования по созданию и совершенствованию методов оценки безопасности движения, которая определяется аварийностью. Оценка безопасности на существующих (длительное время) объектах проводится, как правило, по результатам статистического анализа аварийности.

Основная часть. Аварийность делится на две основные категории: *очаговая* (70%) и *фоновая* (30%) [1]. Очаговая аварийность отвечает на вопрос «где происходит отказ в системе водитель–автомобиль–дорога–среда (ВАДС)» и сконцентрирована в очагах. Здесь причины аварий конкретны, легко и быстро устраняются, а борьба с аварийностью достаточно эффективна, оперативна и некапиталоемка. Фоновая аварийность отвечает на вопрос «когда происходит отказ в системе ВАДС» и рассредоточена по всей улично-дорожной сети. Причины

¹ Глобальный кризис в области безопасности дорожного движения. Повышение безопасности дорожного движения во всем мире / Пункт 46 повестки дня 24 февраля 2010 года [Электронный ресурс] // Шестьдесят четвертая сессия Генеральной ассамблеи ООН. 2010. URL: <http://www.unece.org/trans/doc/2010/wp1/WP1-59-INF1e.pdf>

² Кайгородова Т.В., Иванов А.В., Зимина Е.И. Безопасность дорожного движения [Электронный ресурс] / Т.В. Кайгородова, А.В. Иванов, Е.И. Зимина // Информационный Бюллетень для руководителей здравоохранения ФГУ Центральный НИИ организации и информатизации здравоохранения Росздрава. – 2007. – № 28. – URL: http://whodc.mednet.ru/component/option,com_attachments/id,43/task,download (дата обращения 08.12.2018).

³ Improving global road safety: Note by the Secretary-General [Electronic resource] // United Nations General Assembly Norway. 2011. URL: http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2011/wp1/Improving_Global_Roady_Safety_2011.pdf (дата обращения 2018-03-20).

⁴ Справочно-информационные материалы «Состояние безопасности дорожного движения в Республике Беларусь в 1999–2006 годах и наметившиеся тенденции»: аналит. сб. / под общ. ред. В.Л. Филистовича. – Минск: Полиграф. центр МВД Респ. Беларусь, 2007. – 124 с.

⁵ Аналитический сборник по аварийности. – Минск: Полиграф. центр МВД Респ. Беларусь, 2008. – 81 с.

⁶ Состояние безопасности дорожного движения в Республике Беларусь в 1999–2008 годах и наметившиеся тенденции: аналит. сб. / сост.: В.В. Бульбенков, А.А. Сушко, О.Г. Ливанский; под общ. ред. А.Н. Кулешова. – Минск: Полиграф. Центр МВД Респ. Беларусь, 2009. – 144 с.

⁷ Сведения о состоянии дорожно-транспортной аварийности в Республике Беларусь в 2012 году: аналит. сб. / сост.: В.В. Бульбенков, О.Г. Ливанский; под общ. ред. Н.А. Мельченко. – Минск: МВД Респ. Беларусь, 2013. – 90 с.

аварий лежат в различных областях человеческой деятельности, крайне трудно устраняются, а борьба с аварийностью требует огромных затрат и долговременных усилий.

В связи с этим назрела необходимость проведения комплексных мероприятий, направленных на повышение безопасности дорожного движения за счет проведения научно-исследовательских работ организации движения – аудита организации движения, поскольку любое решение по организации дорожного движения (как существующее, так и предполагаемое к внедрению) может быть оценено по величине потерь [1; 2].

Аудит организации движения является неотъемлемой частью процесса разработки решения еще на стадиях эскизного или детального проектирования, на предэксплуатационной стадии и начальной стадии эксплуатации. Аудит отражает вопросы качества, в т.ч. и безопасности дорожного движения, и позволяет выбрать оптимальные предложенные решения. В нем отражается вся соответствующая информация, необходимая для анализа затрат/выгод различных оцениваемых, планируемых ко внедрению, вариантов⁸.

Как представляется, теоретической основой проведения аудита может быть принят очаговый анализ аварийности⁹ [3; 4]. Его цель – установление конкретных причин конкретных аварий в очаге аварийности. Очаг аварийности – место концентрации не менее трех аварий в год.

На масштабный план очага аварийности наносят дислокацию аварий, по возможности, с минимальным отклонением от реальной. Звездочкой отмечают ориентировочное место аварии, стрелками – траектории движения конфликтующих участников, при этом сплошной стрелкой – предполагаемую траекторию движения транспортных средств, а пунктирной стрелкой – пешеходов. В конце стрелки, принадлежащей, предположительно, виновному участнику, ставится кружок, в котором указывается номер аварии по спецификации, прилагаемой к дислокации аварий. Кружок одновременно указывает и тяжесть последствий аварии: полностью заштрихован (залит) или окрашен в красный цвет – смертельный исход; наполовину заштрихован (залит) или окрашен в синий цвет – ранение; не заштрихован – материальный ущерб. Если в аварии пострадало более одного человека, то кружок делается большего размера и над ним указывается число пострадавших, при этом погибшие выделяются большей по размеру и более жирной цифрой. Если в аварии участвовало более двух транспортных средств или более одного пешехода, то над кружком ставятся соответствующие индексы, например, «ЗТС» (3 транспортных средства) или «2ПШ» (два пешехода). При повторяющихся однотипных (или типовых) авариях к уже нанесенному кружку сзади по ходу движения добавляется следующий кружок и т.д. (рисунок 1).

При этом следует стремиться к тому, чтобы дислокация аварий читалась легко и четко. В спецификации для каждой аварии указывается дата и время ее совершения, тяжесть последствий, а также некоторая другая информация, представляющая интерес для определения причин, например, нетрезвый водитель (НВД), и т.д. На каждый исследуемый очаг должно быть заведено «Дело об очаге аварийности», которое регистрируется и хранится в установленном порядке. «Дело» постоянно пополняется текущей информацией, касающейся изменений регулирования, обустройства, внедрения мероприятий, ремонтов на проезжей части и т.д. Информация ежегодно обновляется (корректируется), вплоть до закрытия «Дела» вследствие ликвидации очага аварийности.

Как уже было сказано выше, очагом аварийности считается конфликтный объект (или ограниченный линейный участок улицы или дороги), на котором происходит не менее трех аварий в год. При этом имеется множество подобных объектов, однако они выпадают из поля зрения организаторов движения. Это неправильно. Такие объекты вносят свою долю в очаговую аварийность, и аварийность на них может быть снижена или полностью ликвидирована. Необходимо оценить масштабы работ по снижению очаговой аварийности и их стоимость на основной части улично-дорожной сети города, в первую очередь, на ее нагруженных маршрутах и магистралах. На рисунке 2 показан фрагмент возможного варианта так называемого линейного графика очаговой аварийности на городской улице.

Он показывает фактическое состояние очаговой аварийности, уровень работ по ее снижению, возможные результаты и необходимые ресурсы. Такая информация, имеющаяся в распоряжении управленческих структур, будет способствовать более активному выделению ресурсов на повышение безопасности движения, в первую очередь, снижение аварийности в очагах. Сегодня такая информация отсутствует, что негативно отражается на уровне работ по повышению безопасности дорожного движения.

⁸ Организация Объединенных Наций / Европейская экономическая комиссия / Комитет по внутреннему транспорту / Рабочая группа по автомобильному транспорту / Сто пятая сессия / Женева, 29 сентября – 1 октября 2010 года / Инфраструктура автомобильного транспорта – Европейское соглашение о международных автомагистралях (СМА): рассмотрение новых предложений по поправкам к СМА / ECE/TRANS/SC.1/2010/3 Экономический и Социальный Совет / General 23 July 2010 Russian Original: English. – 2010. – 13 с.

⁹ Отчет о НИР ГБ 08-34 «Разработка методики снижения очаговой аварийности в населенных пунктах» / Д.В. Капский, Е.Н. Кот, Ю.А. Врубель и др. – Минск: БНТУ, 2009. – 114 с.

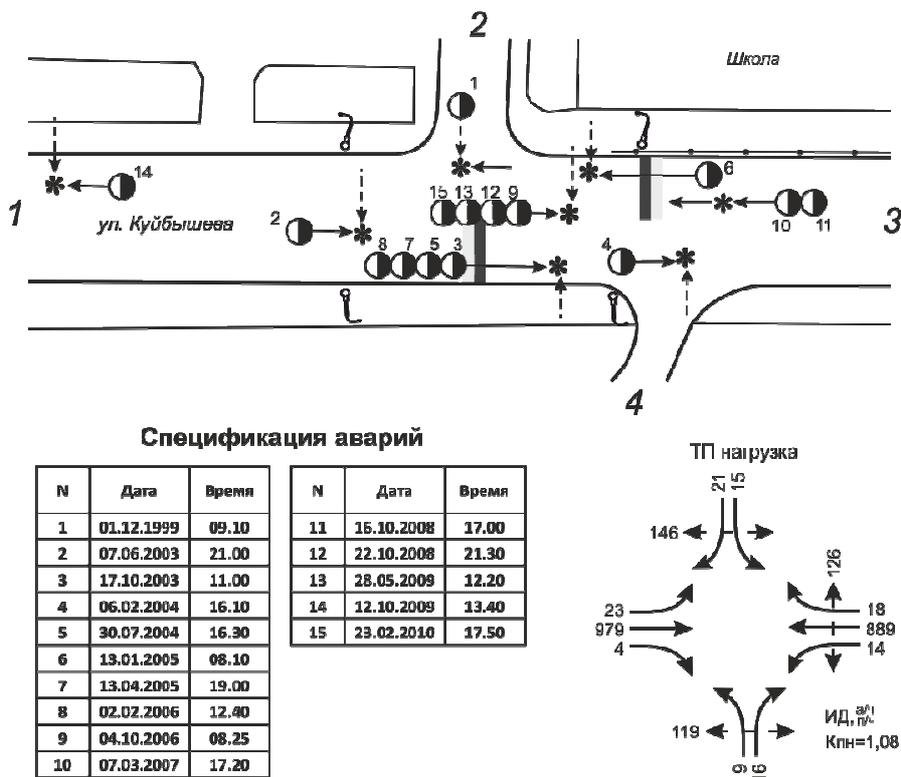
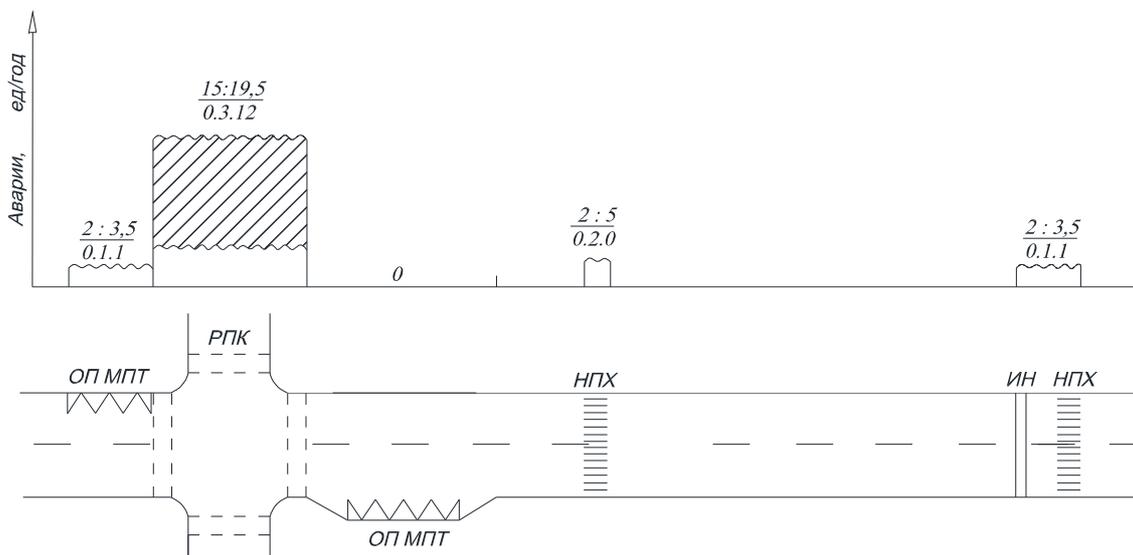


Рисунок 1. – Очаг аварийности на искусственной неровности в зоне нерегулируемого пешеходного перехода по ул. Куйбышева, д. 44 (Минск)



ОП МПТ – остановочный пункт маршрутного пассажирского транспорта; РПК – регулируемый перекресток; НПХ – нерегулируемый пешеходный переход; ИН – искусственная неровность;

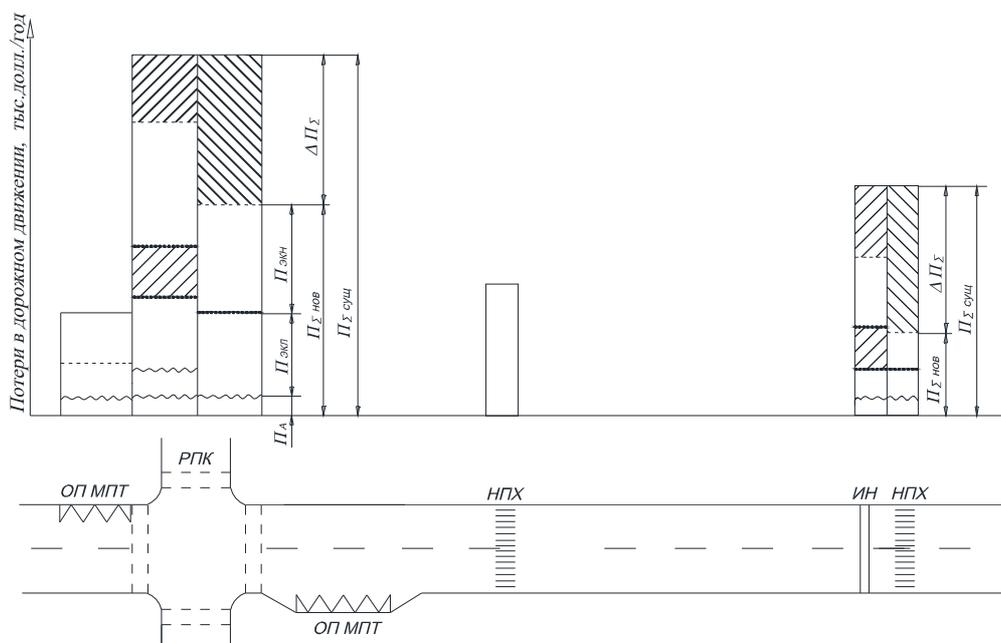
$\frac{15:19,5}{0:3:12}$ – 15 аварий всего; 19,5 – социально-экономически приведенных аварий; 0 – аварии с погибшими;

3 – аварии с ранеными; 12 – аварии с материальным ущербом;

заштриховано – ожидаемое снижение очаговых аварий в результате внедрения разработанных мероприятий

Рисунок 2. – Линейный график очаговой аварийности на городской улице

На рисунке 3 представлен фрагмент линейного графика очаговых потерь в дорожном движении на городской улице, где для каждого конфликтного объекта приведены аварийные, экологические, экономические и суммарные годовые потери и возможное их снижение в результате разработки и внедрения мероприятий. Такая информация позволит более системно распределять имеющиеся возможности на научно-практическую деятельность по повышению качества дорожного движения. Кроме того, она позволит продемонстрировать истинную значимость дорожного движения в реальной экономике страны, особенно его городской составляющей, где на нагруженных улицах ежегодные потери составляют миллионы долларов.



~~~~~ – аварийные потери; ... – экологические потери; - - - – экономические потери; — — — – суммарные потери;  
 $P$  – потери в дорожном движении;  $P_{ав}$  – аварийные;  $P_{эко}$  – экологические;  $P_{экон}$  – экономические;  $P_{\Sigma}$  – суммарные;  
 $\Delta P_{\Sigma}$  – снижение суммарных потерь

Рисунок 3. – Линейный график очаговых потерь в дорожном движении на городской улице

В дальнейшем на линейных графиках вместе с очаговым будут наноситься и потери на перегонах, вызванные снижением и неравномерностью скорости из-за ограничений и невынужденного маневрирования. Это должно способствовать положительному изменению отношения управленцев к организации дорожного движения в городах. Следует отметить, что подобная информация, за исключением потерь в дорожном движении, имеется для автомобильных дорог общего пользования в виде паспорта дороги. В этом паспорте, наряду с техническими характеристиками дороги и обустройства, приводится информация об аварийности в виде линейных графиков коэффициентов аварийности и коэффициентов безопасности. Представляется, что подобная, более современная, документация для нагруженных городских улиц, дополненная информацией об аварийных, экологических и экономических потерях, сыграла бы важную роль в деле повышения качества дорожного движения, включая, разумеется, и безопасность.

На основании проведенных исследований разработана методика аудита организации дорожного движения, включающая методы, методики и правила выполнения отдельных, осуществляемых поэтапно процедур, а именно: сбор и обработку исходных данных об условиях движения и аварийности с материальным ущербом и пострадавшими, предварительное установление причин аварий с использованием перечня типовых причин, натурное обследование очага с использованием разработанного перечня вопросов (бланков аудита), заключительное установление причин аварий и предварительный выбор решений по повышению безопасности движения с использованием разработанного специального перечня типовых мероприятий (решений), отличающаяся относительно невысокими требованиями к специальной подготовке исполнителей, позволяющая с высокой вероятностью установить истинные причины аварий, оценить капиталовложения и предварительно выбрать соответствующие решения по повышению безопасности движения.

**Заключение.** Необходимо отметить, что проведение аудита должно основываться на принципах максимизации опасности, минимизации суммарных потерь, сбалансированного учета потерь, минимизации суммарной народно-хозяйственной стоимости функционирования объекта и обязательной оперативной контрольной оценке аварийной эффективности, включать оценку качества принимаемых решений по критерию минимизации суммарных потерь, оценку качества разработанных мероприятий по критерию минимизации суммарной

народнохозяйственной стоимости функционирования исследуемого объекта и обязательную оперативную контрольную оценку аварийной эффективности внедряемых мероприятий. Это позволит резко, вплоть до ликвидации очага, снизить аварийность, что в совокупности обеспечит разработку и внедрение высокоэффективных мероприятий по повышению безопасности дорожного движения с учетом аварийности, экономичности и экологичности еще на стадии их принятия, и решить важнейшую социально-экономическую и научно-техническую проблему – снижение аварийности на автомобильном транспорте и повышение качества дорожного движения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Капский Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2008. – 243 с.
2. Врубель Ю.А., Капский Д.В., Кот Е.Н. Определение потерь в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2006. – 252 с.
3. Пугачев И.Н. Организация и безопасность движения: учеб. пособие. – Хабаровск: Изд-во ХГТУ, 2004. – 232 с.
4. Аудит дорожного движения – инструмент повышения безопасности движения / Д.В. Капский, П.А. Пегин, А.К. Голловнич и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2018. – № 3. – С. 22–33.

## REFERENCES

1. Kapskii, D.V. (2008). *Prognozirovanie avariinosti v dorozhnom dvizhenii*. Minsk: BNTU. (In Russ.)
2. Vrubel', Yu.A., Kapskii, D.V. & Kot, E.N. (2006). *Opredelenie poter' v dorozhnom dvizhenii*. Minsk: BNTU. (In Russ.)
3. Pugachev, I.N. (2004). *Organizatsiya i bezopasnost' dvizheniya*. Khabarovsk: Izd-vo KhGTU. (In Russ.)
4. Kapskii, D.V., Pegin, P.A., Golovnich, A.K. & Ivanov, V.P. (2018). Audit dorozhnogo dvizheniya – instrument povysheniya bezopasnosti dvizheniya [Audit of traffic as a tool for improving traffic safety]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Bulletin of the Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science]*, (3), 22–33. (In Russ., abstr. in Engl.)

Поступила 16.08.2023

## IMPROVING TRAFFIC AUDIT ORGANIZATION

**D. KAPSKII**

*(Belarusian National Technical University, Minsk)*

**A. BAKHANOVICH**

*(Ministry of Education of the Republic of Belarus, Minsk)*

**G. KUKHARENOK**

*(Belarusian National Technical University, Minsk)*

*The summary: in article examines the theoretical and practical aspects of the audit of road traffic on the roads and streets of the Republic of Belarus. The proposed approach will improve not only the road safety but also the quality of the road – to reduce all types of losses in road traffic.*

**Keywords:** *audit, road transport, traffic organization, accident center.*

УДК 656.13

DOI 10.52928/2070-1616-2023-48-2-41-49

**ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ПОВЫШЕНИЯ ОКУПАЕМОСТИ РАБОТЫ  
ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА  
ЕЖЕДНЕВНЫМ ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ ПАССАЖИРОНАПРЯЖЕННОСТИ**

*канд. техн. наук, доц. С.А. АЗЕМША, С.Ю. ЯНКОВИЧ*  
(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)  
*канд. техн. наук, доц. А.И. ПЕТРОВ*  
(Тюменский индустриальный университет)

*Размер пассажиропотока является одной из основополагающих величин при организации городских пассажирских перевозок в регулярном сообщении. Он определяет количество пассажирских транспортных средств (ПТС) на маршруте, их вместимость, интервалы движения. При этом величина пассажиропотока не является постоянной и может меняться ежедневно в зависимости от дня недели, месяца года и прочих факторов. В то же время количество ПТС, работающих на маршруте, их вместимость и интервалы движения, как правило, изменяются только по типу дня недели (будний/выходной) и сезону (летнее/зимнее расписание). В таких условиях зачастую наблюдается избыток провозных возможностей по сравнению с имеющейся мощностью пассажиропотока, что ведет к неоправданному росту себестоимости работы городского общественного пассажирского транспорта (ГОПТ). Поэтому создание условий, при которых провозные возможности ПТС будут максимально приближаться к величине пассажиропотока, позволит повысить окупаемость работы ГОПТ.*

*Цель публикации – установить факторы, значимо влияющие на величину суточного пассажиропотока, и оценить целесообразность ежедневной подстройки провозных возможностей ПТС под прогнозную величину пассажиропотока с учетом таких факторов.*

**Ключевые слова:** *пассажиропоток, пассажирский модуль, неравномерность, прогнозирование, вместимость.*

**Введение.** Анализ неравномерности пассажиропотока при пассажирских перевозках в научной литературе уделено немало внимания.

Так, в [1, с. 30] показана модель временного ряда (тренда) годового пассажиропотока от фактора времени. Кроме того, авторы использовали ряд Фурье для анализа и прогнозирования внутригодовых колебаний модели сезонной волны (сезонных колебаний). На основании полученных прогнозных данных по пассажиропотоку авторы рекомендуют различные мероприятия по обеспечению рентабельности работы: увеличение тарифа, снижение вместимости работающего на маршруте автобуса, увеличение интервала движения.

В работе<sup>1</sup> предлагается ежедневно, на основании данных о существующем спросе на транспортные услуги и сведений об имеющемся в автопредприятии подвижном составе, решать транспортную задачу с целью оптимального распределения автомобильных транспортных средств по маршрутной сети.

В [2] отмечается, что факторами, влияющими на величину пассажиропотока на маршруте, являются: час суток, день недели и сезон года. Авторами было отмечено, что величины пассажиропотока на маршруте сильно варьируются по дням недели и часам суток.

В [3] исследуется уровень наполняемости общественного пассажирского транспорта в Словакии. Анализ наполняемости троллейбусов был выполнен на четырех городских троллейбусных маршрутах, общее количество исследованных рейсов – 631. Было подсчитано, что средняя степень использования вместимости на рассмотренных маршрутах составляет 33,43% для одиночных транспортных средств и 31,83 для сочлененных. Следовательно, перевозчику целесообразнее было бы провести перераспределение работы троллейбусов разной вместимости. В качестве будущих перспективных способов решения обозначенной в статье проблемы, по мнению авторов, может стать модель, которая будет обновляться в течение определенного периода из-за возможных изменений пассажиропотока. Таким образом, перевозчик может соответствующим образом реагировать на изменения спроса и сократить время перевозки пассажира и себестоимость перевозки, используя подходящее транспортное средство.

В работе<sup>2</sup> на протяжении 2001 года анализировались данные пассажиропотока по каждому рейсу одного из автомобильных перевозчиков г. Нефтеюганска. На основании полученной информации подсчитывался

---

<sup>1</sup> Circulation of Vehicles as an Important Parameter of Public Transport Efficiency. URL: [https://www.researchgate.net/publication/293743648\\_Circulation\\_of\\_Vehicles\\_as\\_an\\_Important\\_Parameter\\_of\\_Public\\_Transport\\_Efficiency?enrichId=rgreq-37625068ec8741e8087a503f56c56e97-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI5Mzc0MzY0ODtBUzozMjc0OTUzNjM2NDU0NDVAMTQ1NTA5MjM4NzY3Mw%3D%3D&el=1\\_x\\_3&\\_esc=publicationCoverPdf](https://www.researchgate.net/publication/293743648_Circulation_of_Vehicles_as_an_Important_Parameter_of_Public_Transport_Efficiency?enrichId=rgreq-37625068ec8741e8087a503f56c56e97-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI5Mzc0MzY0ODtBUzozMjc0OTUzNjM2NDU0NDVAMTQ1NTA5MjM4NzY3Mw%3D%3D&el=1_x_3&_esc=publicationCoverPdf)

<sup>2</sup> Петров А.И., Абдулмажидов А.И. Исследование приспособленности системы городского пассажирского автомобильного транспорта Нефтеюганска к неравномерности пассажиропотоков // Транспортный комплекс-2002: материалы науч.-практ. семинара Междунар. выставки-ярмарки «Город-2002», «АЗС комплекс-200», «Автосалон-200» / г. Тюмень (21–24 мая 2002 г.). – Тюмень: Тюмен. гос. нефтегазовый ун-т, 2002. – С. 154–156.

коэффициент, показывающий соотношение используемых перевозчиком ресурсов и потребностей жителей в перевозках. Для дней недели, в которых значения коэффициента приспособленности системы общественного транспорта к потребностям населения в перевозках больше чем 1,2, авторы предлагают уменьшить количество выпускаемых на линию автобусов.

В [4] проведена аналитическая работа, позволившая определить статистические характеристики критериев оценки степени использования вместимости автобусов (троллейбусов) в ряде городов Республики Беларусь. В качестве критериев оценки степени использования вместимости автобусов (троллейбусов) использовались:

- средняя наполняемость за рейс ( $Np$ ), пасс., – отношение выполненных за рейс пассажиро-километров к длине рейса;

- коэффициент рейсовой вместимости ( $Kpvm$ ) – отношение выполненных за рейс пассажиро-километров транспортной работы к максимально возможной транспортной работе, определяемой произведением вместимости автобуса и расстоянием поездки;

- коэффициент пассажиронапряженности ( $Kпн$ ) – отношение максимального пассажиропотока за рейс (пассажиронапряженности) к вместимости автобуса.

Как было установлено, имеются значимые различия в показанных выше критериях оценки степени использования вместимости автобусов (троллейбусов) по маршрутам их работы, дням недели, часам суток. Также получено, что средняя эффективность использования вместимости пассажирских транспортных средств составляет порядка 30%, что согласуется с данными, приведенными в [3].

Поскольку мощность пассажиропотока сильно вариативна по маршрутам, дням недели, часам суток и т.д., это приводит к несоответствию имеющейся провозной возможности ГОПТ и мощности пассажиропотока и проявляется одним из следующих способов:

- дефицит провозных возможностей – наблюдается в пиковые периоды и приводит к переизбытку пассажиров. Такие ситуации опасны тем, что сильно снижают качество предоставляемых пассажирам услуг и чреват отказом от дальнейшего пользования ГОПТ;

- профицит провозных возможностей – в непииковые периоды и приводит к низкому использованию вместимости ПТС. Такие ситуации дают неоправданно высокую себестоимость выполнения транспортной работы и, как следствие, снижение окупаемости работы ГОПТ.

На практике вопросы дефицита провозных возможностей решаются увеличением вместимости работающих на маршруте ПТС. В итоге это усугубляет проблему профицита провозных возможностей в отличные от пиковых часы (рисунок 1).

На рисунке 1 показан оборотный рейс на маятниковом маршруте, состоящий из  $i$ -й и следующей за ней  $(i + 1)$ -й ездки. При этом объем пассажиропотока при  $i$ -й ездке больше, чем при  $(i + 1)$ -й, и определяется пассажиронапряженностью в 95 и 35 пассажиров соответственно (рисунок 1, а).

В таких условиях в настоящее время провозная способность ГОПТ будет определяться максимальной пассажиронапряженностью, под которую будет подобрана вместимость ПТС. Например, пусть такая вместимость составит 100 пассажиров. Тогда коэффициент пассажиронапряженности за  $i$ -й и  $(i + 1)$ -й ездками составит

визит  $\frac{95 + 35}{100 + 100} = 0,6$ . При росте пассажиронапряженности, например, до 115 пасс (рисунок 1, б), необходимо

увеличить и провозную способность ГОПТ. Выпускать два ПТС суммарной вместимостью не меньше чем пассажиронапряженности и одновременно с этим уменьшить интервал движения на маршруте нецелесообразно с точки зрения резкого роста себестоимости такой перевозки. Поэтому на практике отдают предпочтение варианту увеличения вместимости ПТС, работающего на данном маршруте. Для случая, изображенного на рисунке 1, б, это может быть, например, 120 пассажиров. Тогда коэффициент пассажиронапряженности за две ездки составит

визит  $\frac{115 + 35}{120 + 120} = 0,625$ , что меньше первоначального коэффициент пассажиронапряженности, рассчитанного для

рисунка 1, а. Как видно, такая мера ведет к ухудшению использования вместимости ПТС, а следовательно, к неоправданно высокой себестоимости перевозки и низкой окупаемости работы ГОПТ.

В условиях профицита провозных возможностей ( $(i + 1)$ -я ездка на рисунке 1) перевозчики могут:

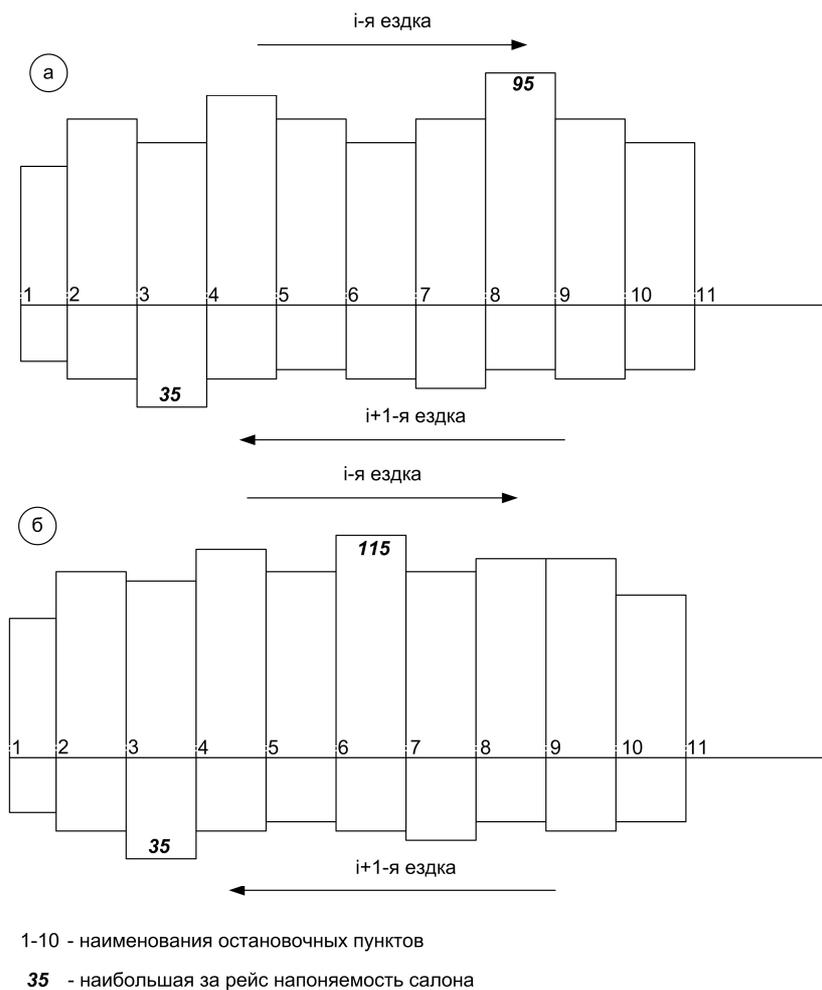
- увеличить интервал движения на маршруте. Эта мера приводит к росту времени ожидания пассажирами, снижению качества предоставляемых услуг и, соответственно, к возможному отказу от услуг ГОПТ;

- снизить вместимость ПТС, которым выполняется  $(i + 1)$ -я ездка.

Снижение вместимости ПТС, которым выполняется ездка, достигается назначением на данную ездку другого ПТС, вместимость которого в большей мере соответствует имеющейся пассажиронапряженности. Для условий рисунка 1 это может быть, например, вместимость 40 пассажиров. Тогда коэффициент пассажиронапряженности составит:

- для условий рисунка 1, а  $\frac{95 + 35}{100 + 40} = 0,93$ ;

- для условий рисунка 1, б  $\frac{115 + 35}{120 + 40} = 0,94$ .



***a*** – до роста пассажиропотока; ***b*** – после роста пассажиропотока

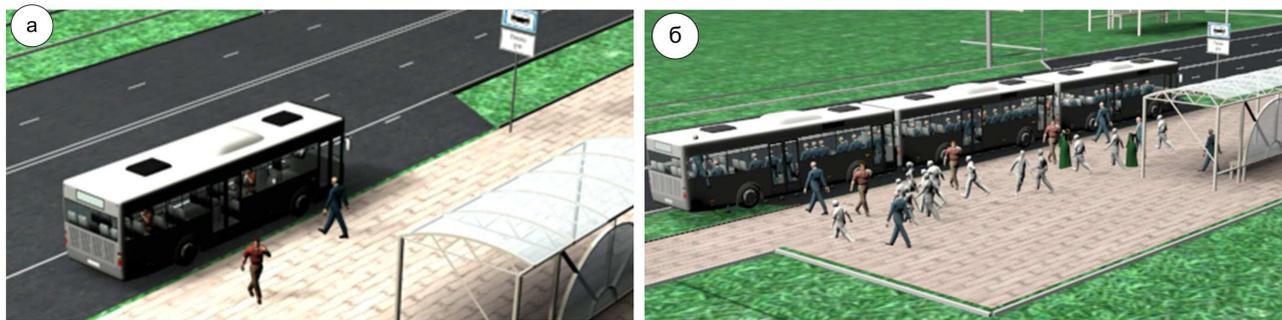
**Рисунок 1. – Картограмма пассажиропотока за оборотный рейс**

Таким образом, применение ПТС разной вместимости позволяет подстроить провозную возможность ГОПТ под имеющуюся мощность пассажиропотока, снизить себестоимость перевозки и повысить окупаемость работы ГОПТ. Однако в данном случае возникает ряд организационных вопросов. Первый: откуда должно взяться ПТС меньшей вместимости? Если оно ожидало выхода в рейс на конечном остановочном пункте, то водитель с ПТС большей вместимости пересаживается на ПТС меньшей вместимости и продолжает работать уже на нем. В этом случае будут иметь место простои ПТС без выполнения работы: в периоды большого пассажиропотока будет проставить ПТС малой вместимости, а в периоды спада пассажиропотока – ПТС большой вместимости. Если же водитель должен будет загнать ПТС большой вместимости в парк, затем пересест на ПТС малой вместимости и на нем продолжить работу, то возникают дополнительные непроизводительные нулевые пробеги. Также наличие парка ПТС разной вместимости предполагает наличие у перевозчика соответствующей ремонтной базы, склада запчастей, что опять же дополнительные затраты.

Чтобы избежать этих ошибок при подстройке провозной способности под имеющуюся величину пассажиропотока, в [5] предложено использование составов модульных ПТС, которые позволяют уменьшать или увеличивать пассажироместность в зависимости от величины пассажиронапряженности для каждого выполняемого рейса (рисунок 2). Тем самым снижается себестоимость выполнения перевозки и растет окупаемость работы ГОПТ. Так, в период спада пассажиропотока уменьшается пассажиронапряженность с коэффициентом пассажиронапряженности<sup>3</sup>, и рейс выполняется составом модульного ПТС, состоящим из одного модуля (рисунок 2, *a*). При росте пассажиропотока увеличивается и пассажиронапряженность<sup>3</sup>. Поэтому на конечных остановочных пунктах в состав модульного ПТС добавляется необходимое количество модулей, обеспечивающих

<sup>3</sup> Аземша С.А. Определение статистической связи между параметрами пассажиропотока и маршрута при городских перевозках пассажиров в регулярном сообщении // Логистический аудит транспорта и цепей поставок: материалы II междунар. науч.-практ. конф. / Тюмень (26 апр. 2019 г.) / отв. ред. С.А. Эртман. – Тюмень: ТИУ, 2019. – С. 8–15.

при выполнении данного рейса суммарную вместимость состава модульного ПТС не меньше пассажиронапряженности (рисунок 2, б). При этом для минимизации себестоимости выполнения такого рейса разница между вместимостью состава модульного ПТС и пассажиронапряженностью должна быть минимальной.



а – один модуль при спаде пассажиропотока; б – три модуля в период роста пассажиропотока

Рисунок 2. – Использование составов модульных ПТС с различным количеством модулей

Предложенный в [5] механизм подстройки провозной способности под имеющуюся мощность пассажиропотока подразумевает наличие данных о пассажиронапряженности для каждого рейса на каждом маршруте. В то же время проведенный анализ литературы показал, что имеется неравномерность пассажиропотока и для каждого отдельного рейса в зависимости от дня недели, сезона года и пр. факторов. Т.е. если на какой то день  $k$  для  $i$ -й ездки на  $j$ -м маршруте величина пассажиронапряженности составляет, например, 70 пассажиров ( $P_{kij} = 70$ ) и для ее выполнения необходим состав модульных ПТС вместимость  $V_{kij}$ , такой что  $V_{kij} - P_{kij} \rightarrow \min$ , при  $V_{kij} - P_{kij} > 0$ , то в другой день значение пассажиронапряженности будет иное ( $P_{lij} \neq P_{kij}$ ), что, возможно, повлечет за собой назначение для выполнения данной ездки иного состава модульного ПТС ( $V_{lij} \neq V_{kij}$ ). Концептуальный механизм такого планирования описан в [6].

Очевидно, что такая подстройка подразумевает определенное оснащение ПТС дополнительным оборудованием, позволяющим вести подсчет числа входящих/выходящих или перевезенных пассажиров. Кроме того, на основании этих данных должно производиться прогнозирование пассажиронапряженности на последующий день с последующим назначением на каждый рейс каждого маршрута своего состава модульного ПТС. Очевидно, что подобное дооснащение ПТС потребует определенных затрат. Поэтому целью данной работы является установить факторы, значимо влияющие на величину суточного пассажиропотока, и оценить целесообразность ежедневной подстройки провозных возможностей ПТС под прогнозную величину пассажиропотока с учетом таких факторов.

**Основная часть.** Для реализации сформулированной цели необходимо установить факторы, влияющие на величину суточного пассажиропотока. В качестве исходных данных выступали:

1. Календарная информация:

- день недели ( $D$ ) – категориальная переменная, указывающая день недели. Принимает семь значений: от понедельника до воскресенья;
- месяц года ( $M$ ) – категориальная переменная, указывающая месяц года. Принимает 12 значений: от января до декабря;
- календарный год ( $G$ ) – категориальная переменная, указывающая календарный год. Принимает три значения: 2020, 2021 и 2022;
- праздник/выходной ( $H$ ) – категориальная переменная, показывающая является ли данный день праздником/выходным или нет. Принимает два значения: «Да» и «Нет».

2. Фактическая информация о погоде на 8 часов утра каждого дня<sup>4</sup>:

- осадки ( $O$ ) – категориальная переменная, показывающая наличие и характеристики осадков. Принимает следующие значения: без осадков; ливень (ливни); дождь; снег или дождь со снегом; туман или ледяной туман или сильная мгла; морось; облака покрывали более половины неба в течение всего соответствующего периода; песчаная или пыльная буря или снежная низовая метель; облака покрывали половину неба или менее в течение всего соответствующего периода; гроза (грозы) с осадками или без них; облака покрывали более половины неба в течение одной части соответствующего периода и половину или менее в течение другой части периода;
- облачность ( $C$ ) – непрерывная переменная, показывающая облачность в %;
- скорость ветра ( $F$ ) – скорость ветра, м/с;

<sup>4</sup> Погода в 240 странах мира [Электронный ресурс] / Архив погоды в Тюмени. URL: [https://tp5.ru/%D0%90%D1%80%D1%85%D0%B8%D0%B2\\_%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D1%8B\\_%D0%B2\\_%D0%A2%D1%8E%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B8](https://tp5.ru/%D0%90%D1%80%D1%85%D0%B8%D0%B2_%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D1%8B_%D0%B2_%D0%A2%D1%8E%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B8) (дата обращения: 19.03.2023).

- ветер ( $W$ ) – категориальная переменная, показывающая направление ветра;
- температура ( $T$ ) – непрерывная переменная, показывающая температуру воздуха в градусах Цельсия.

3. Суточный объем перевозок на всех маршрутах города ( $P$ ) – непрерывная переменная, показывающая суточный объем перевозок пассажирским транспортом в г. Тюмени. Предоставлено автомобильными перевозчиками Тюмени за период с 22 июня 2020 г. по 13 ноября 2022 г.

Выдвигается гипотеза о значимости влияния календарной информации и информации о погоде на суточный объем перевозок.

В таблице 1 приведены основные статистические характеристики зависимой переменной ( $P$ ), на рисунке 3 – гистограмма частот ее распределения, на рисунке 4 – диаграмма размаха.

Таблица 1. – Основные статистические характеристики суточного объема перевозок

| Переменная | N наблюдений | Среднее  | Медиана  | Минимум  | Максимум | Стандартное отклонение | Асимметрия | Стандарт. откл. Асимметрии | Экссесс   | Стандарт. откл. Экссесс |
|------------|--------------|----------|----------|----------|----------|------------------------|------------|----------------------------|-----------|-------------------------|
| P          | 875          | 316458,7 | 324756,0 | 54487,00 | 453409,0 | 85142,71               | -0,396469  | 0,082666                   | -0,910821 | 0,165146                |

Согласно таблице 1, среднее значение суточного объема перевозок составляет 307 073,9 пассажира, а стандартное отклонение равно 92 177,9 пассажира. При этом размах выборки составляет 398 922 пассажира. Все это говорит о достаточно высокой неравномерности этой величины и показывает резерв повышения окупаемости перевозок путем подстройки вместимости ПТС под мощность пассажиропотока в каждый конкретный день.

Из рисунков 3 и 4 следует, что распределение зависимой переменной отлично от нормального закона распределения.

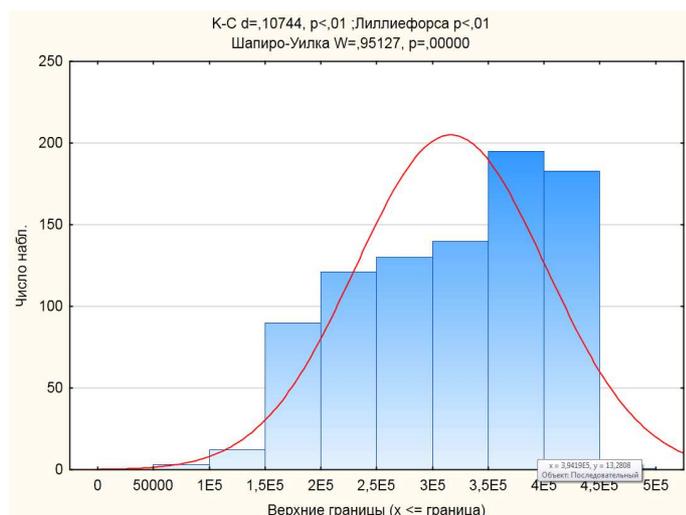


Рисунок 3. – Гистограмма распределения частот суточного объема перевозок

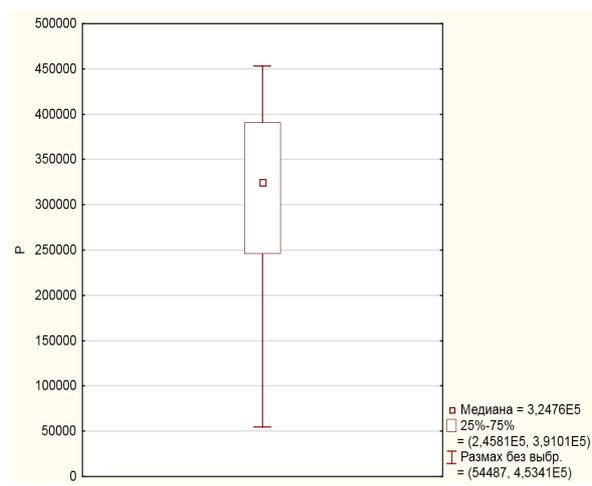


Рисунок 4. – Диаграмма размаха суточного объема перевозок

Динамика изменения суточного объема перевозки пассажиров за рассматриваемый период представлена на рисунке 5. Заметно, что наблюдаются определенные сезонные колебания исследуемой величины. В то же время необходимо отметить наличие большого разброса в суточном объеме перевозки пассажиров, учет которых может дать резервы повышения эффективности использования вместимости ПТС и на этой основе повышение окупаемости работы ГОПТ.

Для углубленной оценки степени влияния независимых переменных на зависимую, а также получения модели, описывающей такую зависимость, в Statistica 13.3 (Serial number JRR709H998119TE-A) с применением технологий интеллектуального анализа данных (Data Mining) была построена математическая модель. Такие технологии обладают рядом преимуществ по сравнению с классическими методами анализа, что и определяет целесообразность их применения для достижения цели данного исследования. При этом для построения моделей применялись методы C@RT, случайного леса, бустинга деревьев, нейронных сетей, опорных векторов. В таблице 2 приведена информация о значимости вклада каждой независимой переменной в значения зависимой. Ряд переменных незначимо влияют на величину зависимой переменной. Поэтому указанные независимые переменные ( $C$ ,  $F$ ) были удалены из модели.

Для оставшихся независимых переменных наилучшую связь с существующими исходными данными показала модель, полученная применением нейронной сети (многослойного перцептрона) архитектуры

MLP 53-10-1 алгоритмом обучения BFGS 31, экспоненциальными функциями активации скрытых и выходных нейронов. Указанная модель обеспечивает коэффициент корреляции для обучающей выборки, равный 0,96, а для тестовой – 0,94.

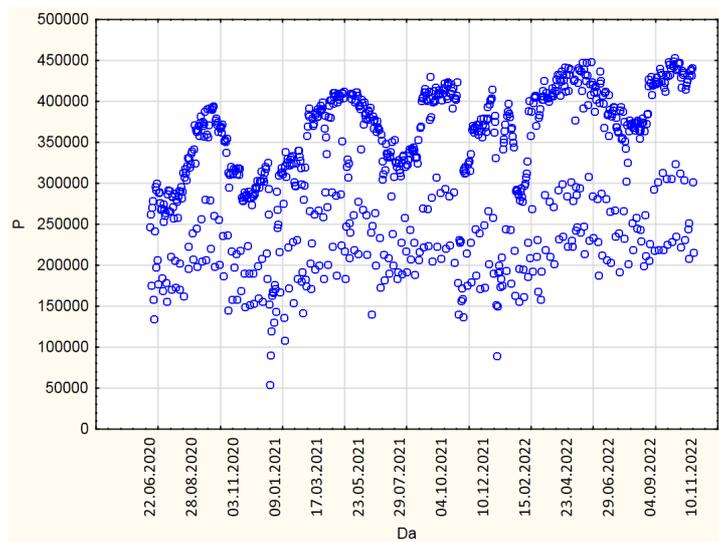


Рисунок 5. – Динамика изменения суточного объема перевозок за рассматриваемый период

Таблица 2. – Значимость вклада независимых переменных в значения зависимой

| Независимая переменная | $F$ -значение | $p$ -значение |
|------------------------|---------------|---------------|
| $H$                    | 100           | 1,000000      |
| $D$                    | 81            | 0,810889      |
| $M$                    | 69            | 0,693560      |
| $G$                    | 57            | 0,570532      |
| $T$                    | 30            | 0,300515      |
| $W$                    | 9             | 0,089880      |
| $O$                    | 7             | 0,072942      |

Таким образом, на величину зависимой переменной значимо влияют:

1. Календарная информация:
  - вид дня (праздник/выходной,  $H$ );
  - день недели ( $D$ );
  - месяц года ( $M$ );
  - календарный год ( $G$ ).
2. Информация о погоде:
  - температура ( $T$ );
  - осадки ( $O$ );
  - ветер ( $W$ ).

На рисунке 6 приведена диаграмма размаха суточного объема перевозок по будним и выходным дням. Медиана среднесуточного объема перевозок в будний день примерно на 70% выше, чем в выходные и праздничные дни. При этом размах выборки уменьшился с 398 922 (см. разницу между минимумом и максимумом в таблице 1) до 301 270 при буднем расписании и 344 138 (см. разницу между минимумом и максимумом на диаграмме размаха на рисунке 6) при выходном (праздничном), что говорит о том, что дифференциация расписания на будний и выходной (праздничный) обеспечивает более точную подстройку провозных возможностей парка ПТС под мощность пассажиропотока и, следовательно, способствует повышению экономической эффективности работы ГОПТ. Оценка значимости различий в этих двух выборках, произведенная по критериям Вальда–Вольфовица, Колмогорова–Смирнова и  $U$ -критерию Манна–Уитни, показала значимость этих различий. На практике увеличение эффективности использования ПТС в таких условиях достигается корректировкой расписания движения в сторону уменьшения количества рейсов, выполняемых в выходные и праздничные дни, а также выпуском ПТС меньшей вместимости (при их наличии).

Кроме того, из рисунка 6 видно, что существует большой разброс в объеме перевезенных пассажиров внутри будних, а также праздничных и выходных дней. Для будних дней имеется ярко выраженная сезонность (рисунк 7). Для выходных и праздничных дней таких явных колебаний не наблюдается.

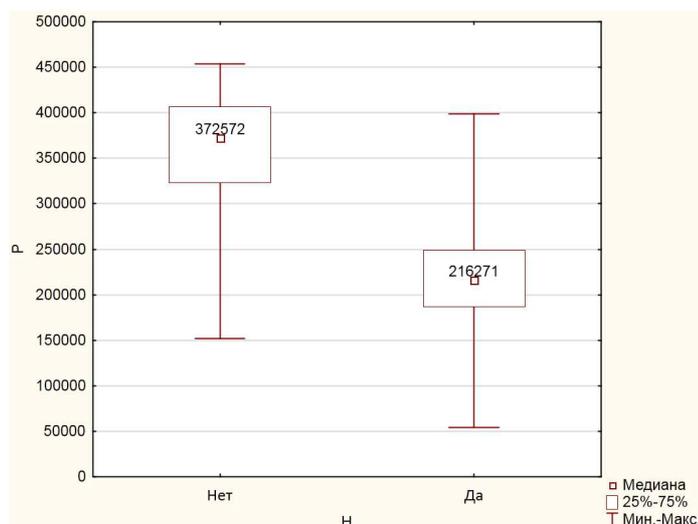
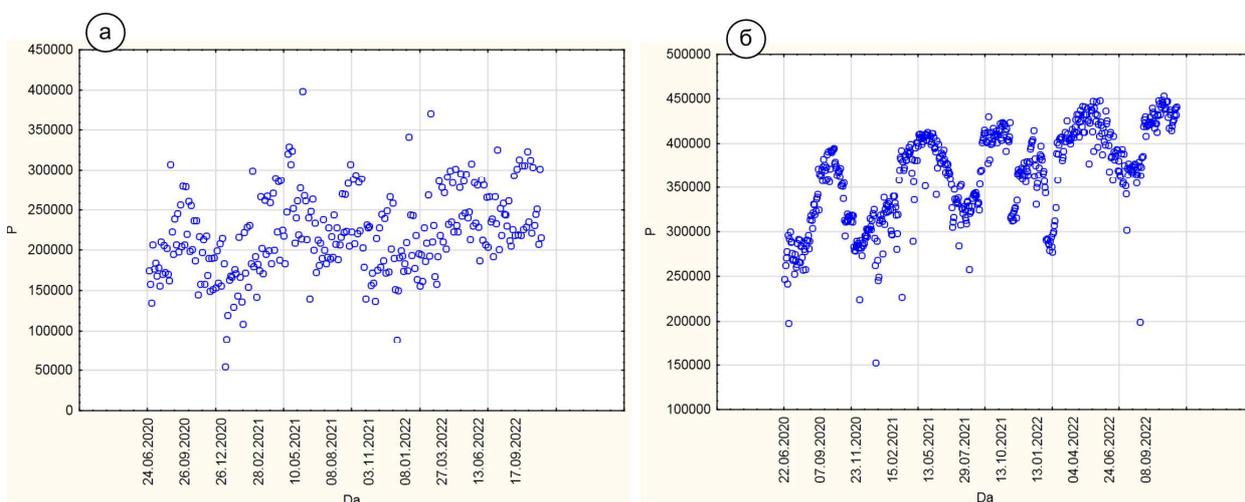


Рисунок 6. – Диаграммы размаха среднесуточного объема перевозок по будним («Нет»), выходным и праздничным дням («Да»)



а – выходные и праздничные дни; б – будние дни

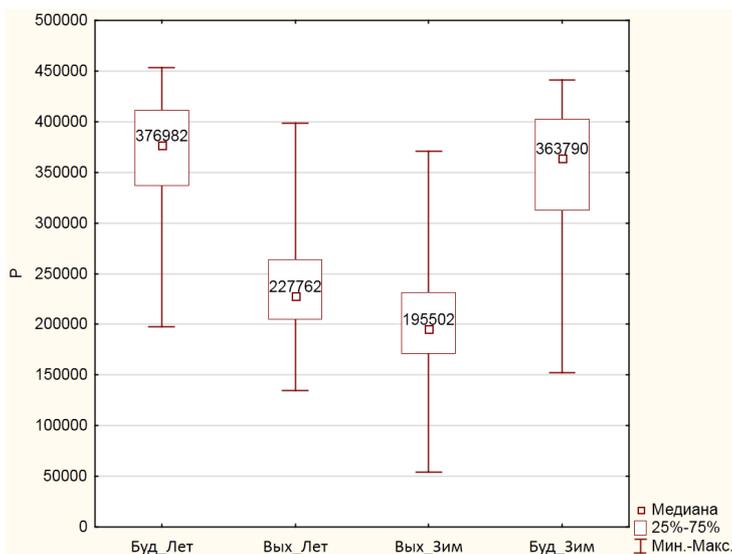
Рисунок 7. – Динамика изменения суточного объема перевозок

В Тюмени летнее расписание действует примерно с 30 апреля по 30 октября<sup>5</sup>. Остальной период действует зимнее расписание. Диаграммы размаха среднесуточного объема перевозок с учетом сезонности расписания и его вида в зависимости от буднего или выходного дня представлены на рисунке 8. Согласно рисунку 8, медиана объема перевезенных пассажиров по выходным дням при летнем и зимнем расписаниях примерно равны. Аналогичная ситуация наблюдается и для будних дней. Анализ значимости различий между ними, выполненный при помощи критерия Краскела–Уоллиса, показал отсутствие значимости таких различий. Т.е. в будние дни в летний период суточный объем перевезенных пассажиров незначимо отличается от значения аналогичного показателя в зимний период. Аналогично и для праздничных (выходных) дней.

Также рисунок 8 иллюстрирует наличие существенного размаха в значениях суточного объема перевозок внутри изображенных групп. Все это показывает недостаточную эффективность реализации летнего и зимнего расписаний движения ГОПТ, т.к. сохраняется большой разброс значений объема перевезенных пассажиров внутри таких групп расписания. При этом максимальное значение размаха выборки объема перевезенных пассажиров уменьшилось с 344 138 пассажиров при выходном расписании до 316 082 пассажиров при зимнем расписании выходного дня. Дальнейшая дифференциация расписания движения с учетом вида дня (праздник/выходной, *H*), дня недели (*D*), месяца года (*M*) и календарного года (*Г*) показывает сни-

<sup>5</sup> ООО «Селдон Новости» [Электронный ресурс] / 33 тюменских автобуса перешли с летних маршрутов на зимнее расписание. URL: <https://news.myseldon.com/ru/news/index/274846774> (дата обращения: 19.03.2023).

жение показателей размаха внутри полученных групп. Установлено при этом максимальные значения показателей размаха будут составлять 252 769 пассажиров. Наибольший размах наблюдается в воскресные дни зимнего расписания 2022 г.



**Рисунок 8. – Диаграммы размаха среднесуточного объема перевозок по будним дням при летнем расписании («Буд\_Лет»), выходным дням при летнем расписании («Вых\_Лет»), выходным дням при зимнем расписании («Вых\_Зим»), будним дням при зимнем расписании («Буд\_Зим»)**

**Заключение.** На суточный объем перевозок пассажиров в г. Тюмени значимо влияют день недели, месяц года, календарный год, праздник/выходной, осадки, ветер, температура. Учет этих факторов позволяет прогнозировать значение суточного пассажиропотока и на основании этого подстраивать вместимость работающих ПТС под фактическое значение пассажиронапряженности на каждом рейсе каждого маршрута.

Для реализации такого подхода необходим сбор и накопление данных о перечисленных выше факторах, значимо влияющих на величину пассажиропотока. Использование систем автоматического подсчета количества перевезенных пассажиров позволит накопить информацию о закономерностях изменения пассажиронапряженности на каждом рейсе каждого маршрута. Прогнозирование с учетом таких закономерностей на каждом рейсе каждого маршрута пассажиронапряженности позволит подстроить под ее величину вместимость ПТС, выполняющих данный рейс. При этом предполагается использовать состав модульных ПТС, позволяющих уменьшать или увеличивать пассажироместимость в зависимости от величины пассажиронапряженности для каждого выполняемого рейса, тем самым снижая себестоимость выполнения перевозки и повышая окупаемость работы ГОПТ. Т.е. на каждый день  $k$  для каждой  $j$ -й ездки каждого на  $i$ -го маршрута можно получить прогнозное значение пассажиронапряженности  $Q_{kij}$  и под нее подстроить вместимость состава модульных ПТС ( $V_{kij}$ ) таким образом, чтобы обеспечивалась минимальная разница между этими величинами. В период спада пассажиропотока уменьшается и пассажиронапряженность, и рейс выполняется составом модульного ПТС из одного модуля. При росте пассажиропотока увеличивается и пассажиронапряженность. Поэтому на конечных остановочных пунктах в состав модульного ПТС добавляется необходимое количество модулей, обеспечивающих при выполнении данного рейса суммарную вместимость состава модульного ПТС не меньше пассажиронапряженности. При этом для минимизации себестоимости выполнения такого рейса разница между вместимостью состава модульного ПТС и пассажиронапряженности должна быть минимальной. Такой подход позволит подстраивать вместимость модульного ПТС под существующую пассажиронапряженность не только по маршрутам, дням недели, часам суток, но и динамически – на каждый день, каждый рейс на каждом маршруте.

Дальнейшие работы в данном направлении целесообразно сосредоточить на сборе данных об изменении пассажиронапряженности на каждом рейсе каждого маршрута и оценке влияния на эту величину календарных и погодных условий; обосновании вместимости модуля с учетом возможных вариантов их конструкции, конструкций сцепных устройств в составе модульного ПТС, ограничений, накладываемых на длину состава модульного ПТС; разработке методики управления парком модулей с учетом варьативности пассажиропотока каждого дня на каждом рейсе каждого маршрута, особенностей маршрутной сети, параметров конечных пунктов и т.д.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белокуров В.П., Мотузка Д.А., Артемов А.Ю. Повышение эффективности эксплуатации автотранспорта при осуществлении сезонных пассажирских перевозок в городах курортных зон // Технология колесных и гусеничных машин. – 2015. – № 3(19). – С. 25–33.

2. Хвостов А.А., Шипилова Е.А., Ребриков Д.И. Планирование и обработка результатов исследования пассажиропотока в рамках маршрута / Научный вестн. Воронеж. гос. архитектурно-строител. ун-та. Сер.: Информац. Технологии в строител., социал. и эконом. системах. – 2013. – № 2. – С. 97–102.
3. Peter Medvid', Marián Gogola and Stanislav Kubaľák. Occupancy of Public Transport Vehicles in Slovakia // *Transportation Research Procedia*. – 2020. – № 44. – P. 153–159. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.02.022
4. Аземша С.А., Грищенко Т.В., Ясинская О.О. Исследование наполняемости автобусов при городских перевозках пассажиров в г. Могилеве // Вестн. Полоц. гос. техн. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2020. – № 11. – С. 62–69.
5. Аземша С.А. Разработка предложений по повышению эффективности работы общественного городского пассажирского транспорта // Вестник СибАДИ. – 2019. – № 16(5). – С. 544–557. DOI: 10.26518/2071-7296-2019-5-544-557
6. Аземша С.А., Янкович, С.Ю. Повышение эффективности пассажирских перевозок городским транспортом регулярного сообщения с учетом колебаний пассажиропотока // Вестн. Полоц. гос. техн. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2023. – № 1(47). – С. 65–70. DOI: 10.52928/2070-1616-2023-47-1-65-70

## REFERENCES

1. Belokurov, V.P., Motuzka, D.A. & Artemov, A.Yu. (2015). Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii avtotransporta pri osushchestvlenii sezonnykh passazhirsikh perevozk v gorodakh kurortnykh zon [Improving the efficiency of motor transport operation during the implementation of seasonal passenger transportation in the cities of resort areas]. *Tekhnologiya kole-snykh i gusenichnykh mashin [Technology of wheeled and tracked vehicles]*, 3(19), 25–33. (In Russ., abstr. in Engl.)
2. Khvostov, A.A., Shipilova, E.A. & Rebrikov, D.I. (2013). Planirovanie i obrabotka rezul'tatov issledovaniya passazhiropotoka v ramkakh marshruta [Planning and processing the results of a study of passenger traffic within the route]. *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Informatsionnye tekhnologii v stroitel'nykh, sotsial'nykh i ekonomicheskikh sistemakh [Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Information technologies in building, social and economic systems]*, (2), 97–102. (In Russ., abstr. in Engl.)
3. Medvid', P., Gogola, M. & Kubaľák, S. (2020). Occupancy of Public Transport Vehicles in Slovakia. *Transportation Research Procedia*, (44), 153–159. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.02.022 (In Engl.)
4. Azemsha, S.A., Grishchenko, T.V. & Yasinskaya, O.O. (2020). Issledovanie napolnyaemosti avtobusov pri gorodskikh perevozkakh passazhirov v g. Mogileve [Study of the occupancy of buses in urban transportation of passengers in the city of Mogilev]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Bulletin of the Polotsk State Technical University. Series B, Industry. Applied Science]*, (11), 62–69. (In Russ., abstr. in Engl.)
5. Azemsha, S.A. (2019). Razrabotka predlozhenii po povysheniyu effektivnosti raboty obshchestvennogo gorodskogo passazhirsikogo transporta [Development of proposals to improve the efficiency of public urban passenger transport]. *Vestnik SibADI [The Russian Automobile and Highway Industry Journal Vestnik SibADI]*, 16(5), 544–557. DOI: 10.26518/2071-7296-2019-5-544-557 (In Russ., abstr. in Engl.)
6. Azemsha, S.A. & Yankovich, S.Yu. (2023). Povyshenie effektivnosti passazhirsikh perevozk gorodskim transportom regul'yarnogo soobshcheniya s uchetom kolebanii passazhiropotoka [Improving the efficiency of passenger transportation by regular public transport, taking into account fluctuations in passenger traffic]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Bulletin of Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Sciences]*, 1(47), 65–70. DOI: 10.52928/2070-1616-2023-47-1-65-70 (In Russ., abstr. in Engl.)

Поступила 16.08.2023

**EVALUATION OF THE POTENTIAL TO INCREASE RETURN ON WORK  
URBAN PASSENGER TRANSPORT DAILY PASSENGER VOLUME FORECAST**

**S. AZEMSHA, S. YANKOVICH**  
(Belarusian State University of Transport, Gomel)  
**A. PETROV**  
(Industrial University of Tyumen)

*The size of passenger traffic is one of the fundamental values in the organization of urban passenger traffic in regular traffic. It determines the number of passenger vehicles (PTS) on the route, their capacity, traffic intervals. At the same time, the volume of passenger traffic is not constant and can change daily depending on the day of the week, month of the year and other factors. At the same time, the number of vehicles operating on the route, their capacity and intervals of movement, as a rule, change only by the type of day of the week (weekday/weekend) and by season (summer/winter schedule). In such conditions, there is often an excess of carrying capacity compared to with the available capacity of passenger traffic, which leads to an unjustified increase in the cost of urban public passenger transport (OPPT). Therefore, the creation of conditions under which the transportation capacity of the PTS will be as close as possible to the size of the passenger traffic will increase the payback of the work of the GOPT.*

*The purpose of the publication is to establish factors that significantly affect the amount of daily passenger traffic and assess the feasibility of daily adjustment of the transportation capacity of the TCP to the forecast value of passenger traffic, taking into account such factors.*

**Keywords:** passenger flow, passenger module, unevenness, forecasting, capacity.

## ПАРАМЕТРЫ КОМПОНЕНТОВ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СЕТИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ И ИХ РАСЧЕТ

*канд. техн. наук, доц. А.С. ГУРСКИЙ, канд. техн. наук, проф. Е.Л. САВИЧ  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

*Рассмотрены компоненты высоковольтных сетей электромобилей и их взаимосвязь с компонентами низковольтных сетей, а также способы их преобразования. Показана зависимость массогабаритных параметров от напряжения передаваемого тока высоковольтной сети электромобиля. Расчеты подтвердили возможность использования параметра «падение напряжения» в проводах для контроля силы тока без использования дополнительных шунтов. Описаны отличительные особенности выходных силовых ключей и схема драйвера инвертора. Проанализирована работа однофазной мостовой схемы с четырьмя различными состояниями включения. Представлен принцип организации синусоидальной формы с использованием широтно-импульсной модуляции, с приведенной осциллограммой формируемого сигнала. Показан синтез системы трехфазного переменного тока. Определены параметры абсолютного и относительного скольжения ротора электродвигателя путем считывания, частоты вращения и положения ротора электродвигателя и вращающегося магнитного поля статора при считывании с выходных каскадов инвертора.*

**Ключевые слова:** *электромобиль, высоковольтная сеть, параметры, напряжение, сопротивление, электродвигатель, инвертор, высоковольтная аккумуляторная батарея, фаза.*

**Введение.** Популярность электрических и гибридных автомобилей растет с каждым годом. Как общественный транспорт все чаще используются электробус и троллейбус с повышенным запасом хода. Предприятия по обслуживанию автомобилей приобретают электрическую окраску. Одновременно со всеми достоинствами электрический транспорт привносит ряд трудностей, с которыми сталкиваются обслуживающие предприятия. Помимо опасности при выполнении работ, в первую очередь возникают трудности с диагностированием электромобилей и гибридных автомобилей. Основой качественной диагностики является знание конструкции отдельных компонентов и электромобиля в целом<sup>1</sup>.

В любой современной системе можно выделить три основных компонента:

- электронный блок управления системы;
- исполнительные устройства;
- датчики и шины данных.

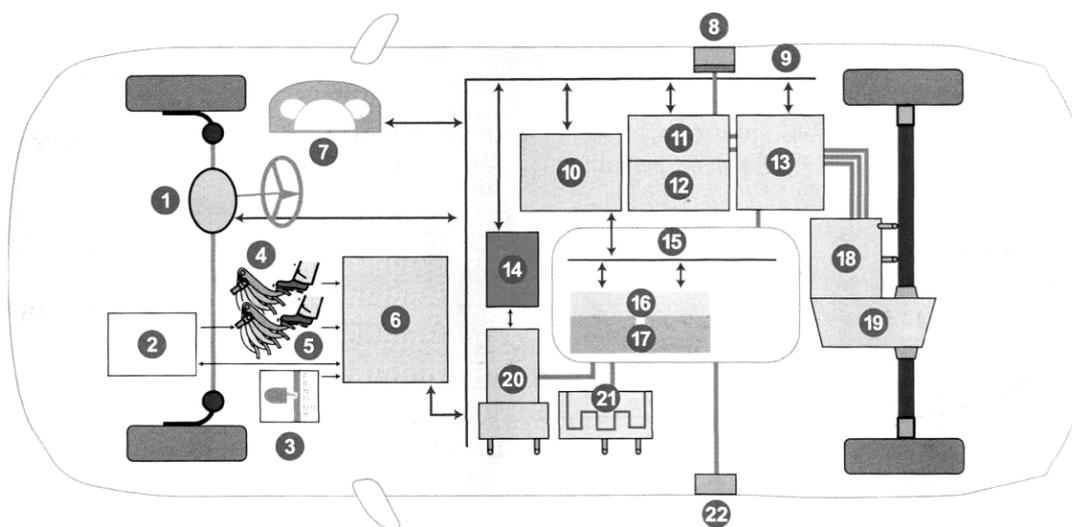
Однако в системе существует и не основной, но очень важный компонент – коммутационная аппаратура. По статистике вероятность возникновения неисправностей, связанных с коммутационной аппаратурой, достигает 30%.

Представляя электромобиль в виде системы, можно детально рассмотреть все составляющие компоненты и подсистемы. Каждая подсистема может быть представлена как отдельная система, выполняющая специфические функции. В данной работе будет уделено внимание системе передачи и преобразования высоковольтной энергии, которой являются инвертор и коммутационная аппаратура. В электромобилях и гибридных автомобилях используется высоковольтная сеть и низковольтная бортовая сеть. Бортовая низковольтная сеть 12 В питает все системы электромобиля как и в традиционных автомобилях, такие как система освещения, сигнализации, безопасности и др. Высоковольтная сеть используется для снабжения электропривода большой электрической мощностью [1]. Напряжение высоковольтной сети обычно составляет от 400 до 800 вольт, иногда выше. Электроснабжение низковольтной сети осуществляется от кислотной свинцовой аккумуляторной батареи и инвертора постоянного тока, а на гибридных автомобилях иногда используется и классический низковольтный генератор.

**Основная часть.** Электронный блок управления (ЭБУ) (англ. Electronic Control Unit (ECU)) 6 электромобиля или гибридного автомобиля питается от низковольтной бортовой сети и активируется электрическим выключателем (замком) зажигания (рисунок 1). Являясь координатором высоковольтной системы, ЭБУ объединен в сеть с традиционными системами автомобиля: тормозной системой 5, рулевым управлением 1 и наиболее важными высоковольтными компонентами: высоковольтной батареей 15 и инвертором 13. Основной обмен данными с датчиками и исполнительными механизмами происходит по шине CAN 9 [2; 3]. ЭБУ управляет инвертором по сети CAN или FlexRay с использованием импульсно-кодовой модуляции в двоичной системе

<sup>1</sup> Савич Е.Л., Гурский А.С. Анализ конструкций, методов и средств диагностирования гибридных автомобилей и электромобилей // Автомобиле- и тракторостроение: материалы Междунар. науч.-практ. конф. В 2 т. – Минск: БНТУ, 2019. – Т. 2. – С. 69–73.

исчисления. Используя полученные сигналы, ЭБУ реализует все заложенные функции работы электромобиля. В зависимости от характера движения электромобиля реализуется режим электродвигателя или генератора посредством переключения инвертора.



1 – электродвигатель рулевого управления; 2 – электровакуумный насос; 3 – щиток приборов; 4 – педаль акселератора; 5 – педаль тормоза; 6 – ЭБУ электромобиля; 7 – рычаг выбора режимов движения; 8 – зарядная розетка; 9 – шина CAN; 10 – ЭБУ высоковольтной батареи; 11 – бортовой зарядный блок; 12 – DC/DC преобразователь; 13 – инвертор; 14 – ЭБУ кондиционера; 15 – высоковольтная батарея; 16 – датчик батареи; 17 – аккумуляторная батарея; 18 – электродвигатель; 19 – трансмиссия; 20 – компрессор кондиционера; 21 – отопитель; 22 – разъем быстрой зарядки

Рисунок 1. – Общая схема электромобиля и сопутствующих компонентов

Для реализации требуемой частоты вращения ротора и крутящего момента, создаваемого электродвигателем, ЭБУ определяет необходимое потребление электроэнергии от высоковольтной аккумуляторной батареи (ВАКБ) на основании сигналов различных датчиков [3]:

- положения педали акселератора (хода) 4 (сигнал нагрузки);
- положения педали тормоза 5;
- скорости автомобиля (сигнала скорости);
- положения селектора режима движения 7;
- состояния заряда тяговой батареи и ее температуры 16;
- передаваемого крутящего момента.

Из шин передачи данных в ЭБУ поступают сигналы от блока контроля состояния батареи и инвертора от датчиков температуры электродвигателя, инвертора, высоковольтной аккумуляторной батареи, датчика скорости движения.

В высоковольтной сети основным потребителем является высоковольтный трехфазный инвертор, который в свою очередь снабжает силовой электропривод.

Кроме этого, в высоковольтную сеть подключаются и другие потребители, такие как электрические обогреватели салона и ВАКБ, установленные в некоторых электромобилях, и инвертор преобразования постоянного тока высокого напряжения в постоянный ток низкого напряжения для обеспечения питанием всех потребителей низковольтной сети, в т.ч. для зарядки 12-вольтовой свинцово-кислотной батареи. Дополнительной функцией высоковольтной системы является снабжение электрического компрессора системы кондиционирования воздуха, для двигателя привода которого также используется трехфазный инвертор.

Для того чтобы высоковольтная система была активированной и работоспособной, должны выполняться все следующие условия:

- 12-вольтовая батарея подключена к бортовой низковольтной системе;
- зажигание включено;
- сервисный выключатель или главный выключатель высоковольтной системы включен;
- изоляция высоковольтных компонентов и высоковольтных проводов соответствует необходимым значениям;
- все штекерные соединения исправны;
- датчик удара не активирован.

Коммутационная аппаратура в зависимости от реализации может содержать различные компоненты, однако наиболее часто используемыми являются кабели, соединители, контакторы, аварийные и сервисные выключатели. Кабели могут быть как одножильными, так и двухжильными. Отличительной особенностью высоковольтных кабелей является оранжевый цвет.

При фиксированном уровне мощности более высокие напряжения позволяют уменьшать силу тока, что дает возможность передавать электроэнергию с относительно небольшим сечением электропроводки. Влияние величины напряжения на массогабаритные размеры определяется следующим образом. Весь энергетический расчет следует начинать с классической формулы электрической мощности, передаваемой от системы накопления энергии к электроприводу [4]:

$$P = U \cdot I, \text{ Вт.} \quad (1)$$

В соответствии с приведенной формулой при низком напряжении для передачи нескольких десятков киловатт электроэнергии, необходимых для движения транспортного средства, должен протекать ток с силой, измеряемой тысячами ампер.

В электроприводе принято, что потери напряжения по длине проводника должны быть не более 5%. В таком случае падение напряжения  $\Delta U$  на участке цепи – не более

$$\Delta U = 0,05U, \text{ В.} \quad (2)$$

При этом сопротивление проводника  $R$  принимается

$$R = \frac{\Delta U}{I}, \text{ Ом.} \quad (3)$$

Определяется сечение проводника как

$$S = \frac{\rho \cdot L}{R}, \text{ мм}^2. \quad (4)$$

Далее, используя формулу площади поперечного сечения, вычислим диаметр  $D$  проводника:

$$D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}, \text{ мм.} \quad (5)$$

$$m = \rho_m \cdot L \cdot S, \text{ кг.} \quad (6)$$

Поскольку удельное сопротивление  $\rho$  проводника из меди составляет 0,0175 Ом, длина подключения от высоковольтной АКБ к инвертору равна 2 м, количество проводников – 2, плотность меди  $\rho_m = 8900 \text{ кг/м}^3$ , то все значения массогабаритных параметров для различных уровней напряжения при передаче электроэнергии при тех же мощностных параметрах рассчитываются по приведенным формулам и сведены в таблицу.

Таблица. – Зависимость диаметра проводников, массы и падения напряжения от передаваемого напряжения

| $U$ | $m$      | $D$      | $\Delta U$ |
|-----|----------|----------|------------|
| 12  | 20,76667 | 27,25295 | 0,6        |
| 24  | 5,191667 | 13,62647 | 1,2        |
| 36  | 2,307407 | 9,084315 | 1,8        |
| 48  | 1,297917 | 6,813237 | 2,4        |
| 60  | 0,830667 | 5,450589 | 3          |
| 72  | 0,576852 | 4,542158 | 3,6        |
| 84  | 0,42381  | 3,893278 | 4,2        |
| 96  | 0,324479 | 3,406618 | 4,8        |
| 108 | 0,256379 | 3,028105 | 5,4        |
| 200 | 0,07476  | 1,635177 | 10         |
| 300 | 0,033227 | 1,090118 | 15         |
| 400 | 0,01869  | 0,817588 | 20         |
| 500 | 0,011962 | 0,654071 | 25         |
| 600 | 0,008307 | 0,545059 | 30         |
| 700 | 0,006103 | 0,467193 | 35         |
| 800 | 0,004673 | 0,408794 | 40         |

Сравнивая габаритные размеры проводников при напряжении 12 В и 800 В, получаем: диаметр провода в  $27,3/0,4 = 67,5$  раз в первом случае больше, чем во втором, а масса будет больше в  $20,77/0,0047 = 4500$  раз. Результаты расчета подтверждают, что увеличение силы тока требует увеличения сечения кабеля  $S$ , что на практике ограничивается стоимостью, весом и местом в автомобиле.

При проведении расчетов в таблицу сведены значения падения напряжения на высоковольтных проводах. При постоянной потребляемой мощности величина падения напряжения прямо пропорциональна передаваемому напряжению. После преобразования формулы (3) получим формулу падения напряжения на участке цепи в соответствии с законом Ома:

$$\Delta U = R \cdot I, \text{ В.} \quad (7)$$

При постоянстве сопротивления провода  $R$  величина падения напряжения прямо пропорциональна силе тока в проводе. Параметры «падение напряжения» и «напряжение» могут быть считаны непосредственно с высоковольтных проводов. Высоковольтные провода определенного сечения и определенной длины могут быть использованы в качестве шунтов для определения падения напряжения и соответственно силы тока в цепи. Данный способ с учетом погрешности температуры может быть применен для контроля с высокой точностью силы тока в проводах.

$$I = f(\Delta U), \text{ А.} \quad (8)$$

Мощность в пиковых режимах для электромобиля при напряжении 800 В может достигать 200 А, что соответствует мощности 160 кВт. Расчет сечения провода необходимо проводить исходя из этой мощности, однако следует иметь в виду, что длина проводов в электромобиле (электробусе) может быть значительно больше, чем указанные 4 м, а это требует увеличения сечения провода.

Для обеспечения работы привода в режиме электродвигателя инвертор получает питание постоянного тока от высоковольтной аккумуляторной батареи и преобразует его в 3-фазный переменный ток. Эта функция является главной в назначении инвертора. Инвертор выполняет сложное преобразование постоянного тока в переменный с изменяющейся частотой, силой тока в обмотках и амплитудой выходного сигнала, что позволяет четко управлять частотой вращения вала и крутящим моментом электродвигателя. Таким образом, происходит векторное управление электрической мощностью с высоким коэффициентом полезного действия. Регулирование крутящего момента и мощности дает возможность поддерживать заданную скорость электромобиля и его ускорение. Ускорение электродвигатель должен обеспечить, начиная с низкой скорости, а затем поддерживать по мере ее увеличения. От скорости увеличения частоты вала электродвигателя зависит приемистость электромобиля. В генераторном режиме инвертор выполняет обратное преобразование в виде выпрямления и сглаживания напряжения.

В основе инвертора используется трехфазная полумостовая схема с биполярными транзисторами с изолированным затвором (БТИЗ) (от англ. Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)) или транзисторами метал-оксид-полупроводник (МОП) управляемыми электрическим полем (от англ. Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistors (MOSFET)). У транзисторов MOSFET в качестве достоинств следует отметить простоту, дешевизну и высокую скорость срабатывания. Но основной недостаток данного типа транзисторов заключается в квадратичном увеличении силы тока потерь за счет увеличения внутреннего сопротивления канала. Этот недостаток указывает на предпочтительное применение транзисторов с комбинированной схемой включения БТИЗ. Сопротивление канала элементов растет пропорционально изменению силы тока<sup>2</sup> [5]. Упрощенная эквивалентная схема БТИЗ представлена на рисунке 2.

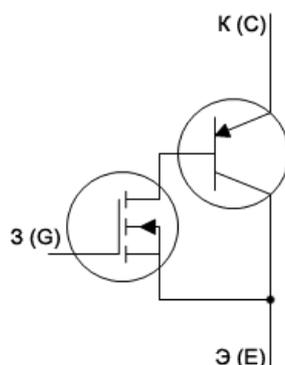


Рисунок 2. – Обозначение упрощенной эквивалентной схемы БТИЗ

<sup>2</sup> URL: <https://go-radio.ru/igbt-transistor.html>

Подобные комбинированные схемы применялись и ранее, например, схема Дарлингтона, однако комбинации полевых и биполярных позволили получить наилучшие параметры линейности изменения сопротивления. Первый транзистор, как правило, выполняет функцию усиления сигнала по напряжению, второй – по силе тока. Затвор полевого транзистора является общим входом для комбинированной схемы и обозначается как затвор (англ. Gate). Эмиттер биполярного транзистора структуры *P-N-P* является в комбинированной схеме коллектором (англ. Collector), а соединенные параллельно коллектор биполярного транзистора и исток полевого образуют эмиттер (англ. Emitter) комбинированного транзистора. Сток полевого транзистора подключен к базе биполярного транзистора.

Для каждого выходного транзистора используются специальные интегральные схемы – драйверы. Суть работы драйвера заключается в ускорении открывания и закрывания транзисторов, т.к. во время увеличенного переходного процесса открывания и закрывания выделяется огромная тепловая энергия в канале полевого транзистора, способная привести к тепловому пробую последнего. Схема простейшего драйвера затвора транзистора приведена на рисунке 3.

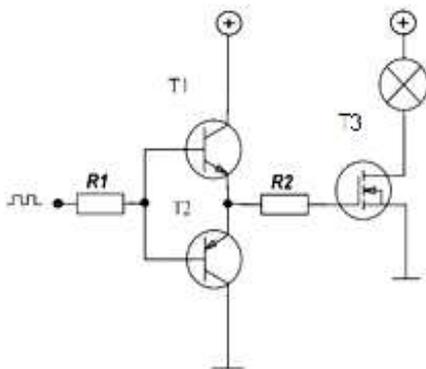


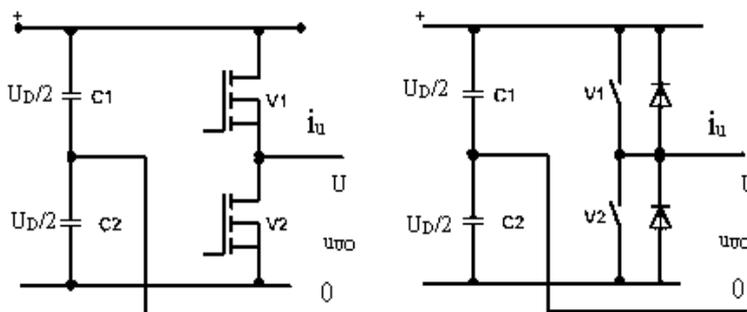
Рисунок 3. – Схема простейшего драйвера затвора полевого транзистора

Замедление работы полевого транзистора связано с наличием емкости между затвором и каналом, т.е. данная часть транзистора представляет собой конденсатор, который при подаче на него питания заряжается. Для ускоренного открывания транзистора следует за очень короткий промежуток времени на затвор управляемого транзистора мгновенно подать положительный потенциал. Это обеспечивается за счет открывания управляющего транзистора T1, при этом транзистор T2 должен быть закрыт. Закрывание полевого транзистора обеспечивается подачей на него низкого (отрицательного) потенциала через эмиттерно-коллекторный переход транзистора T2 при предварительно закрытом транзисторе T1. Транзисторы управления имеют различные проводимости, что позволяет включать одновременно их базы для получения управляющего сигнала от микропроцессора или другого управляющего устройства. Соединенные вместе эмиттеры этих транзисторов и являются водителями состояния затвора полевого или комбинированного выходного транзистора. Одновременно с этим необходимо отметить, что соединение эмиттеров с затвором выполнено последовательно через резистор R2, обладающий малым сопротивлением, однако достаточным для ограничения силы тока в процессе перезарядки емкости затвор–канал. Резистор R1 используется для ограничения тока в базовой цепи транзисторов и выходной цепи управляющего устройства.

Современные схемы инверторов и вентиляльных преобразователей работают на частоте переключения транзисторов в диапазоне от 5 до 20 кГц. Чем выше частота переключения, тем меньше пульсация тока электродвигателя и уровень шума в диапазоне работы органов слуха человека, однако повышение частоты чревато увеличением потери электроэнергии в электрическом двигателе за счет вихревых токов. Одновременно с этим растут потери электроэнергии в инверторе. При увеличении частоты растет количество переключений в единицу времени, что сокращает срок службы инвертора. Увеличение частоты работы инвертора при постоянном соотношении времени включенного и выключенного состояния приводит к повышению температуры переходов транзисторов, что в свою очередь снижает КПД инвертора. Перед конструкторами постоянно стоит вопрос в определении необходимой частоты для оптимальной работы инвертора. При реализации силовой части инвертора с драйвером управления в отличие от простейшей схемы в состав драйвера включаются дополнительные компоненты в виде устройств защиты и ограничителей. Для повышения качества функционирования и предотвращения выхода из строя инверторы подключены к системе охлаждения электромобиля. Управление охлаждением регулируется с использованием специального 12-вольтового насоса охлаждающей жидкости, управляемого сигналом ШИМ.

В инверторе используется обратная связь от внутренних датчиков положения вала электродвигателя и силы тока в его фазных обмотках, что обеспечивает плавную подачу питания с максимальной производительностью и эффективностью. Кроме этого, сигналы датчика положения вала электродвигателя позволяют изменять в инверторе угол фазы переменного тока в зависимости от требуемого уровня крутящего момента.

Принцип организации системы управления инвертора можно рассмотреть на примере простейшей однофазной мостовой схемы. Для пояснения ее работы применяется эквивалентная схема, состоящая из двух выключателей и двух диодов (рисунок 4). Данная схема широко применяется в различных преобразовательных схемах, в т.ч. в понижающем инверторе постоянного тока для питания сети низкого напряжения.



$UD$  – напряжением промежуточного контура;  $C1, C2$  – емкости конденсаторов;  $uU0$  – амплитуда напряжения;  
 $i_u$  – действующая сила тока;  $U$  – напряжение;  $V1, V2$  – ключи  
 (в виде полевых транзисторов и в виде переключателей, поясняющих работу транзисторов)

Рисунок 4. – Принцип действия однофазной системы инвертора с приведением к эквивалентной схеме

В двухтактных преобразователях требуется деление питающего напряжения на две равные части. На сегодня наиболее часто используются следующие схемы: конденсаторная и трансформаторная. В трансформаторной схеме деление напряжения происходит за счет отвода средней точки провода в первичной обмотке трансформатора. Такая схема используется в схемах повышения и понижения напряжения.

Конденсаторная схема более простая и чаще применима для управления двигателями переменного тока. Напряжение питания схемы осуществляется от промежуточного контура, состоящего из двух последовательно-включенных конденсаторов  $C1, C2$ . Это напряжение называется напряжением промежуточного контура  $UD$ , который может иметь внутреннее сопряжение с высоковольтной аккумуляторной батареей. Отвод от средней точки конденсаторов позволяет получить среднее значение напряжения источника питания. В таком случае, если этот отвод принять за «ноль», верхнее плечо конденсаторов дает возможность получить положительное значение напряжения со значением  $UD/2$ , а нижнее – отрицательное со значением  $UD/2$ .

Для схемы характерны четыре различных состояния включения.

1. Переключатель  $V1$  замкнут; переключатель  $V2$  разомкнут. Выходное напряжение  $uU0$  составляет  $UD/2$ ;
2. Переключатель  $V1$  разомкнут; переключатель  $V2$  замкнут. Выходное напряжение  $uU0$  составляет  $-UD/2$ ;
3. Оба переключателя  $V1$  и  $V2$  замкнуты. Это состояние схемы недопустимо, т.к. схема является короткозамкнутой. В таком случае инвертор переходит в аварийный режим с полным прекращением работы.
4. Оба переключателя  $V1$  и  $V2$  разомкнуты. Это состояние используется в качестве режима покоя.

При эксплуатации используются только состояния схем 1 и 2. Приведенная схема является простым примером преобразователя постоянного тока в переменный. Выходное напряжение представляет собой сигнал прямоугольной формы, имеющий амплитуду  $UD/2$ . Питание подается на обмотки в полном объеме, однако такая схема имеет очень низкий КПД преобразования за счет дискретных включений обмоток. Кроме этого, происходит нагрев обмоток и повышение уровня шума в работе. Осциллограммы формируемых сигналов прямоугольной формы и сигнал с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) приведены на рисунке 5.

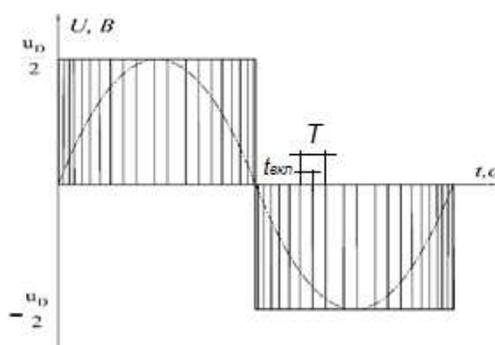


Рисунок 5. – Осциллограммы формируемых сигналов

В данной схеме высота выходного напряжения является фиксированной и может регулироваться только путем изменения напряжения промежуточного контура  $UD$ . Как видно из осциллограммы, амплитуда сигнала равна половине питающего напряжения  $UD/2$ .

Для получения правильной синусоидальной формы данный сигнал необходимо модулировать с использованием широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Суть данной модуляции заключается в подаче на обмотки силы тока, близкой к синусоидальному сигналу. Для реализации данной функции при постоянном питающем напряжении требуется изменять скважность сигнала в различных точках периода. Согласно рисунку 5, наибольшая ширина импульсов включения расположена в точках экстремумов, а наименьшая в переходах между полупериодами. Так реализуется плавность изменения тока в обмотках.

Если же сигнал представляет синусоидальную форму, то амплитуду выходного сигнала с частотой  $f$  можно вычислить, используя следующее выражение:

$$A = U_d \sin(2\pi ft + \phi), \text{ В}, \quad (9)$$

где  $2\pi f$  – угловая частота;

$\phi$  – начальный угол поворота магнитного поля в обмотке, смещение точки отсчета от нулевого значения, рад.

Период определяется как величина, обратно пропорциональная частоте. Время включенного состояния соответствует ширине импульса при постоянной частоте сигнала. Частота выходного напряжения определяется тактовой частотой управляющего устройства. При увеличении частоты сигнала соответственно изменяются длительности периода и длительности включенного состояния, однако коэффициент заполнения остается постоянным.

Коэффициент заполнения – самый важный параметр сигнала ШИМ. Определить его можно по формуле

$$k_3 = \frac{t_{\text{вкл}}}{T}, \quad (10)$$

где  $t_{\text{вкл}}$  – время включенного состояния;

$T$  – период сигнала.

Наибольший коэффициент заполнения импульсов наблюдается в точках экстремумов синусоиды (см. рисунок 5), что показывает на наибольшую величину силы тока в этих точках. Значит, величина силы тока в цепи зависит от коэффициента заполнения. Проводя испытания, можно установить эмпирическую зависимость между этими параметрами.

$$I = f(k_3), \text{ А}. \quad (11)$$

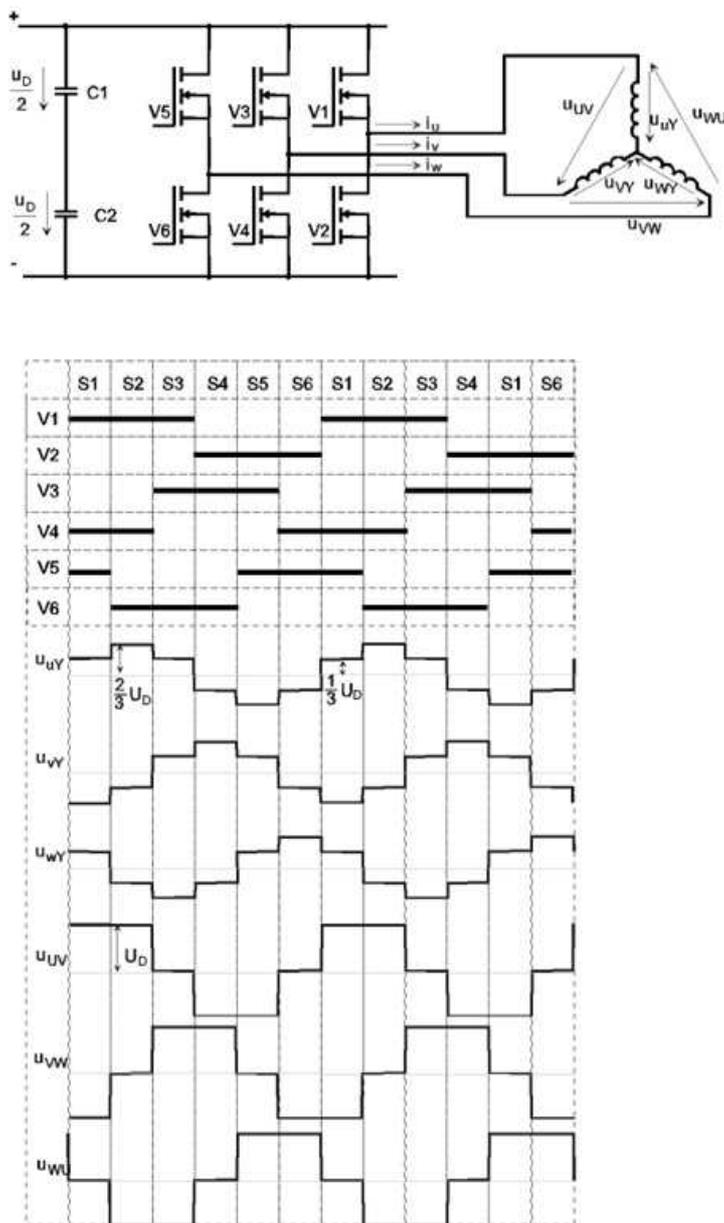
Подобным образом в схеме, состоящей из трех полумостов, можно синтезировать систему трехфазного переменного тока. Пример схемы и соответствующие выходные напряжения приведены на рисунке 6.

Каждый полумост отвечает за одну фазу. При положительных полуволнах пропускает верхний транзистор, при отрицательных – нижний.

Рассмотрим принцип образования вращательного электромагнитного поля в обмотках статора двигателя. Все периоды работы полупроводниковых приборов в выходном каскаде разбиты на 3 сектора, каждый сектор равен  $60^\circ$  угла поворота.

Начнем с первого транзистора фазы  $U$ . Он находится в открытом состоянии в течение первых трех секторов S1-S3, второй транзистор в мосту находится в противофазе и соответственно должен быть закрыт. Одновременно с этим в секторе S1 открыты транзисторы V4 и V5. В данном случае электрический ток протекает по пути от положительного входа через два открытых транзистора V1, V5 и соответственно через фазные обмотки статора  $U$  и  $W$ , а затем проходит через нулевой провод, фазу V и далее через транзистор V4 на отрицательный вывод питания. Следует обратить внимание на то, что в этот момент сила тока в цепи обмотки V равна сумме сил токов в обмотках  $U$  и  $W$ . Таким образом, магнитное поле статора в трех обмотках взаимодействует с обмотками ротора и поворачивает ротор на угол  $60^\circ$ . После перехода ротора происходит переключение секторов: V1 и V4 остаются в открытом состоянии, транзистор V5 закрывается, а транзистор V6 открывается. Это значит, что направление тока в обмотках  $U$  и  $V$  сохраняется, а в обмотке  $W$  меняется на противоположное. При этом сила тока в обмотке  $U$  будет соответствовать сумме сил токов в обмотках  $V$  и  $W$ . В результате взаимодействия магнитных полей ротор повернется еще на  $60^\circ$ , а система коммутации перейдет в следующий сектор: V1 и V6 остаются в открытом состоянии, транзистор V4 закрывается, а транзистор V3 открывается. Это значит, что направление тока в обмотках  $U$  и  $W$  сохраняется, а в обмотке  $V$  меняется на противоположное. При этом сила тока в обмотке  $W$  будет соответствовать сумме сил токов в обмотках  $V$  и  $U$ . В результате взаимодействия магнитных полей ротор повернется еще на  $60^\circ$ , а система коммутации перейдет в следующий сектор. Транзистор V1 закрывается и открывается V2 и весь процесс повторяется. Однако все изменения будут происходить зеркально всем пунктам, описанным ранее, до тех пор, пока не откроется транзистор V1. Приведенный рисунок отражает про-

цесс формирования линейных напряжений инвертора, которые могут быть определены путем графического сложения фазных значений напряжения.



$U_{UY}$  – линейное напряжение между фазами U и Y;  $U_{VY}$  – линейное напряжение между фазами V и Y;  $U_{WY}$  – линейное напряжение между фазами W и Y;  $U_{UV}$  – линейное напряжение между фазами U и V;  $U_{VW}$  – линейное напряжение между фазами V и W;  $U_{WU}$  – линейное напряжение между фазами W и U; V1...V6 – транзисторные ключи; S1...S6 – периоды замкнутого или разомкнутого состояния транзисторов;  $i_u, i_v, i_w$  – действующие значения сил фазных токов в фазах U, V и W соответственно

Рисунок 6. – Трехполумостовая схема и соответствующие выходные напряжения

Считывание сигнала с выходных каскадов инвертора позволяет определять положение магнитного поля в статоре электрического двигателя, что может быть параметром для определения скольжения электродвигателя. Преобразуя формулу (9), получаем начальный угол поворота магнитного поля в обмотке.

Данная зависимость позволяет по величине напряжения отследить параметр «угловое положение магнитного поля»:

$$\phi = \arcsin \frac{A}{U_d} - 2\pi ft, \text{ рад.} \tag{12}$$

При сравнения положения магнитного поля с физическим положением ротора появляется возможность определить параметр «абсолютное скольжение» ротора с высокой точностью, который позволяет выявлять высокую чувствительность и даже при незначительных нагрузках зависит от величины крутящего момента. Параметр «крутящий момент» определяется по формуле

$$M = f(\phi), \text{ Нм.} \quad (13)$$

Параметр «относительное скольжение ротора асинхронного двигателя» – относительная разность скоростей вращения ротора и изменения переменного магнитного потока, создаваемого обмотками статора двигателя переменного тока, можно рассчитать как

$$S = \frac{f - n}{f}, \quad (14)$$

где  $f$  – частота вращения магнитного поля статора;  
 $n$  – частота вращения ротора электродвигателя.

Известно, что в режиме холостого хода скольжение стремится к 0, а при увеличении нагрузки оно увеличивается. Следовательно, параметр «относительное скольжение ротора» с достаточной точностью отражает нагрузку на валу электрического асинхронного двигателя при воздействии большого крутящего момента. Параметр «крутящий момент» определяется как

$$M = f(S), \text{ Нм.} \quad (15)$$

**Заключение.** Рассмотрена схема электромобиля с описанием основных компонентов. Проведен расчет поперечного сечения, диаметров и массы проводников высоковольтной сети электромобиля в зависимости от величины напряжения. Также рассмотрена силовая часть инвертора с драйвером управления спецификой силовых ключей. Представлен принцип организации трехфазного тока с использованием широтно-импульсной модуляции и функционирования инвертора. Определен перечень диагностических параметров для мониторинга технического состояния и дистанционного диагностирования электромобилей.

*Выводы:*

1. Параметр «падение напряжения» и соответствующий ему параметр «сила тока» могут быть считаны непосредственно с высоковольтных проводов электромобиля, т.к. высоковольтный провод определенной сечения и определенной длины может быть использован в качестве шунта.
2. Параметр «абсолютное скольжение ротора электродвигателя» находят по разности физического положения ротора и положения магнитного поля статора путем считывания сигнала с выходных каскадов инвертора. По абсолютному скольжению ротора можно с высокой точностью определить параметр «крутящий момент» электрического асинхронного двигателя электромобиля при небольших нагрузках.
3. Параметр «относительное скольжение ротора электродвигателя» вычисляется по разности частот вращения магнитного поля статора и вращения ротора путем считывания сигнала с выходных каскадов инвертора. По относительному скольжению ротора можно с достаточной точностью определить параметр «крутящий момент» электрического асинхронного двигателя при больших нагрузках электромобиля.
4. Все вышеперечисленные параметры могут быть использованы для мониторинга высоковольтных сетей и дистанционного диагностирования электромобиля после проведения предварительных испытаний и расчета коэффициентов соответствующих эмпирических зависимостей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Савич Е.Л. Легковые автомобили: учеб. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ИНФРАМ, 2022. – 758 с.
2. Савич Е.Л. Устройство автомобилей. Двигатели: учеб. пособие. – Минск: Выш. шк., 2019. – 334 с.
3. Гурский А.С. Анализ параметров высоковольтных аккумуляторных батарей электробусов с целью создания алгоритмов их общего и поэлементного диагностирования с применением телематических систем // 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.
4. Уланов, А.Г. Теория наземных транспортных средств. Тяговый расчет электромобиля: учеб. пособие. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2018. – 389 с.
5. Schmidt Torsten. Pojazdy hybrydowe i elektryczne w praktyce warsztatowej. Budowa, dzialanie, podstawy obslugi. – Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2020. – 172 s .

#### REFERENCES

1. Savich, E.L. (2022). *Legkovye avtomobili*. Moscow: INFRAM. (In Russ.)
2. Savich, E.L. (2019). *Ustroistvo avtomobilei. Dvigateli*. Minsk: Vysheishaya shkola. (In Russ.)

3. Gurskii, A.S. (2022). Analiz parametrov vysokovol'tnykh akkumulyatornykh batarei elektrobusev s tsel'yu sozdaniya algoritmov ikh obshchego i poelementnogo diagnostirovaniya s primeneniem telematicheskikh system [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]. In S.V. Kharitonchik (Ed.), *Transport i transportnye sistemy: konstruirovaniye, ekspluatatsiya, tekhnologii* [Transport and transport systems: design, operation, technologies: collection of scientific articles], (4), 12–20. (In Russ., abstr. in Engl.)
4. Ulanov, A.G. (2018). *Teoriya nazemnykh transportnykh sredstv. Tyagovyi raschet elektromobilya*. Chelyabinsk: Izdatel'skii tsentr YuUrGU. (In Russ.)
5. Schmidt, T. (2020). *Pojazdy hybrydowe i elektryczne w praktyce warsztatowej. Budowa, dzialanie, podstawy obslugi*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. (In Polish)

Поступила 18.04.2023

## PARAMETERS OF THE COMPONENTS OF THE HIGH VOLTAGE NETWORK OF ELECTRIC CARS AND THEIR CALCULATION

A. GURSKY, E. SAVICH  
(Belarusian National Technical University, Minsk)

*The article considers the components of high-voltage networks of electric cars and their relationship with the components of low-voltage networks, as well as the methods of their conversion. The dependence of the weight and size parameters on the voltage of the electric car high-voltage network is shown. The calculations showed the possibility of using the "voltage drop" parameter in the wires to control the current strength without using additional shunts. The distinctive features of the output power switches and the inverter driver circuit are shown. The operation of a single-phase bridge circuit with four different switching states is analyzed. The principle of organizing a sinusoidal form using pulse-width modulation is shown, with a given oscillogram of the generated signal. The synthesis of a three-phase alternating current system is shown. The parameters of the absolute and relative slip of the motor rotor are determined by reading the rotational speed and position of the motor rotor and the rotating magnetic field of the stator when reading from the output stages of the inverter.*

**Keywords:** electric car, high-voltage network, parameters, voltage, resistance, electric motor, inverter, high-voltage storage battery, phase.

УДК 629.7

DOI 10.52928/2070-1616-2023-48-2-60-65

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА ВЕРТОЛЕТНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

*В.А. ПОТАПОВ, канд. тех. наук, доц. А.А. САНЬКО  
(Белорусская государственная академия авиации, Минск)*

*Целью работы является повышение качества со снижением трудоемкости диагностирования осевого компрессора вертолетного газотурбинного двигателя при эрозионно-абразивном изнашивании его лопаток. Выявлены закономерности изменения структурных и диагностических параметров компрессора в зависимости от наработки и региона эксплуатации двигателя. Обоснованы значения основных газодинамических параметров и износа лопаток компрессора и связей между ними, определяющих предельное состояние вертолетного газотурбинного двигателя типа ТВ3-117. Предложена методика определения остаточного ресурса компрессора, учитывающая регион эксплуатации вертолета. Проведена оценка качества диагностирования компрессора с применением газодинамических параметров вертолетного газотурбинного двигателя в эксплуатации.*

**Ключевые слова:** *диагностирование, газотурбинный двигатель, осевой компрессор, износ лопаток, запас устойчивости, помпаж, остаточный ресурс, зависимости газодинамических параметров.*

**Введение.** Важной задачей в эксплуатации авиационной техники государственной авиации Республики Беларусь (ГА РБ) является совершенствование как структуры технической диагностики, так и процессов, направленных на объективное определение технического состояния основных элементов воздушного судна с минимальными трудозатратами. Одним из основных элементов воздушного судна является газотурбинный двигатель (ГТД). Для вертолетных ГТД ресурсные возможности в основном определяются техническим состоянием компрессора [1]. Главной проблемой в эксплуатации ГТД является ухудшение характеристики компрессора вследствие эрозионно-абразивного изнашивания его лопаток, приводящего к потере газодинамической устойчивости (помпажу) [2]. Объективное определение запаса устойчивости компрессора вертолетных ГТД и его ресурса – важная научно-техническая задача эксплуатирующих данный вид техники организаций, решение способствует ее поддержанию на высоком уровне надежности.

**Постановка задачи.** Исследования осевого компрессора вертолетного газотурбинного двигателя как объекта технического диагностирования (контроля технического состояния) показали:

- известные методы определения запаса устойчивости компрессора, основанные на анализе его газодинамических параметров, в основном применяются в заводских условиях при испытаниях двигателей. Их использование в условиях эксплуатации затруднительно [2];
- используемые сегодня в эксплуатации методы косвенного определения запаса устойчивости компрессора по износу элементов его проточной части [3] имеют высокую степень субъективности, большую трудоемкость и не дают прогноз остаточного ресурса компрессора с учетом эксплуатационных факторов двигателя;
- среди множества эксплуатационных воздействий наиболее значительными, влияющими на изнашивание лопаток осевого компрессора, являются воздействия мелких частиц пыли, песка и абразива. Износ лопаток прямо пропорционален суммарному количеству пыли, прошедшей через воздушный тракт ГТД, или ее концентрации в воздухе [4];
- проводимые в ряде стран исследования закономерностей изменения геометрических и газодинамических параметров проточной части компрессора от наработки вертолетного ГТД применимы для отдельных регионов эксплуатации и не находят практического применения в условиях Республики Беларусь [5];
- вопрос использования газодинамических характеристик компрессора с целью диагностирования его технического состояния не раскрыт в достаточной мере.

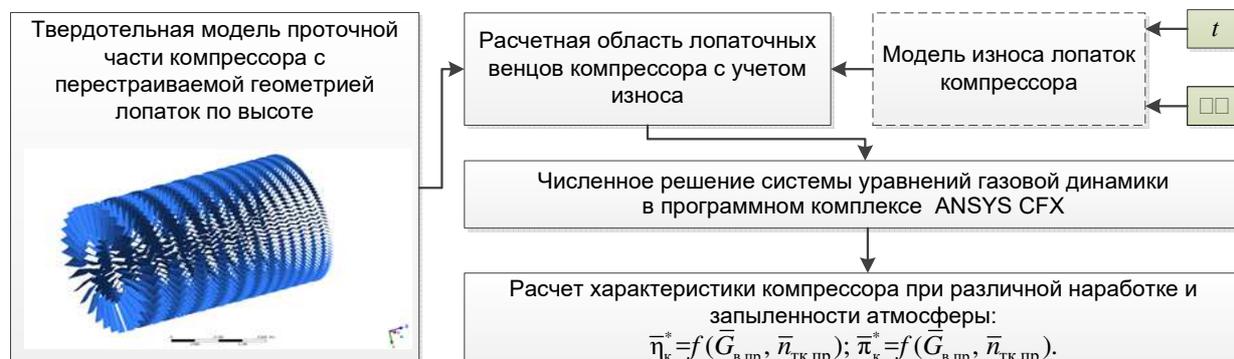
Таким образом, проведенные исследования доказывают необходимость внедрения в эксплуатацию ГТД новых методов и средств контроля, повышающих качество диагностирования компрессора, с определением вида и содержания работ в зависимости от региона эксплуатации двигателя. Это возможно за счет исследования закономерностей изменения структурных и диагностических параметров компрессора и взаимосвязей между ними в зависимости от наработки и региона эксплуатации двигателя (запыленности атмосферы).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- теоретико-экспериментальные исследования газодинамических параметров и геометрических величин лопаток компрессора от наработки двигателя и запыленности атмосферы региона эксплуатации вертолета;
- выбор газодинамических параметров двигателя, представляющих диагностическую ценность в определении технического состояния осевого компрессора при эрозионно-абразивном изнашивании его лопаток;
- Разработка методики определения остаточного ресурса осевого компрессора с учетом региона эксплуатации вертолета.

**Решение задач.** В качестве объекта исследования был выбран 12-ступенчатый осевой компрессор широко применяемого в мире и в ГА РБ двигателя типа ТВ3-117. Для исследования газодинамической характе-

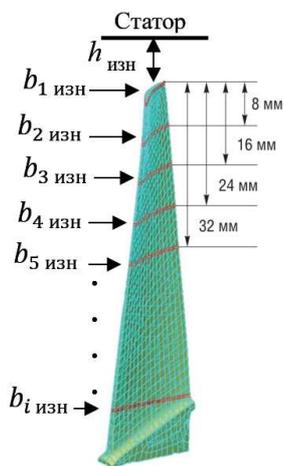
ристики компрессора с учетом закономерностей износа лопаток от наработки двигателя и запыленности атмосферы разработана методика расчета, учитывающая форму изношенной поверхности лопатки и основанная на численном решении уравнений газовой динамики с описанием лопаточных венцов компрессора (рисунок 1).



$t$  – наработка двигателя, ч;  $PM$  – концентрация пыли в воздухе,  $мкг/м^3$ ;  $\eta_k^*$  – коэффициент полезного действия компрессора;  $\bar{G}_{в пр}$  – приведенный секундный расход воздуха, проходящего через входное сечение компрессор,  $кг/с$ ;  $\bar{n}_{тк пр}$  – приведенная частота вращения ротора компрессор,  $об/мин$ ;  $\pi_k^*$  – степень повышения полного давления воздуха в компрессоре

Рисунок 1. – Блок-схема методики расчета газодинамических параметров и износа лопаток осевого компрессора вертолетного газотурбинного двигателя типа ТВ3-117 от наработки и запыленности атмосферы

Блок-схема методики расчета (см. рисунок 1) включает в себя разработанную твердотельную модель проточной части компрессора с перестраиваемой геометрией лопаток [4]. Для расчета газодинамических параметров компрессора, учитывающих форму изношенной поверхности лопаток по высоте в отличие от существующих одномерных расчетов [6], разработана модель износа лопаток компрессора. Модель износа представляет собой эмпирические зависимости износов хорд пера по сечениям и радиального зазора между лопатками рабочего колеса (РК) и статором компрессора от концентрации пыли и наработки двигателя (рисунки 2, 3) [4].



$$h_{изн} = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot PM + 2 a_3 \cdot t \cdot PM, \quad (1)$$

$$b_{i\text{ изн}} = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot PM + 2 a_3 \cdot t \cdot PM \quad (2)$$

Рисунок 2. – Зависимости износа хорды пера по сечениям лопатки  $b_{i\text{ изн}}$  и радиального зазора  $h_{изн}$  между лопаткой РК и статором компрессора от  $PM$  и  $t$

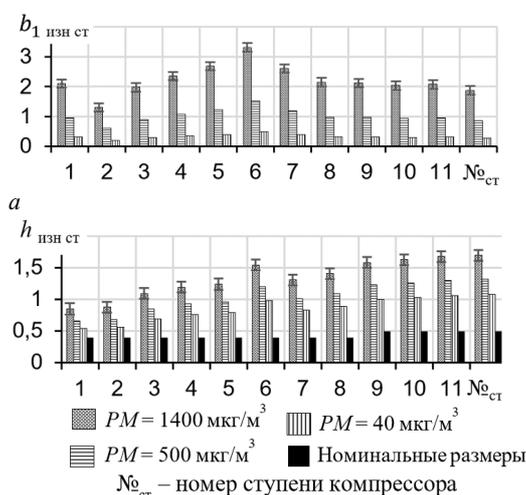


Рисунок 3. – Гистограмма износа хорды  $b_{i\text{ изн ст}}$  и радиального зазора  $h_{изн ст}$  у периферии рабочих лопаток компрессора

На основе предварительных расчетов газодинамических параметров входной ступени компрессора с использованием разработанной методики установлено (рисунок 4), что полученные зависимости износа лопаток компрессора от наработки и среднегодовой концентрации пыли в воздухе, с учетом формы изношенной поверхности лопаток, позволяют повысить точность определения газодинамических параметров компрессора до 10% [6]. Расчет газодинамических параметров всего компрессора при различной наработке  $t$  и запыленности

атмосферы  $PM$  на номинальном режиме работы ГТД ( $n_{тк пр} = 95\%$ ) (рисунок 5) позволил установить снижение степени повышения давления воздуха в компрессоре, коэффициента полезного действия, приведенного расхода воздуха и запаса газодинамической устойчивости компрессора  $\Delta K_y$  для различных регионов эксплуатации двигателей [4].

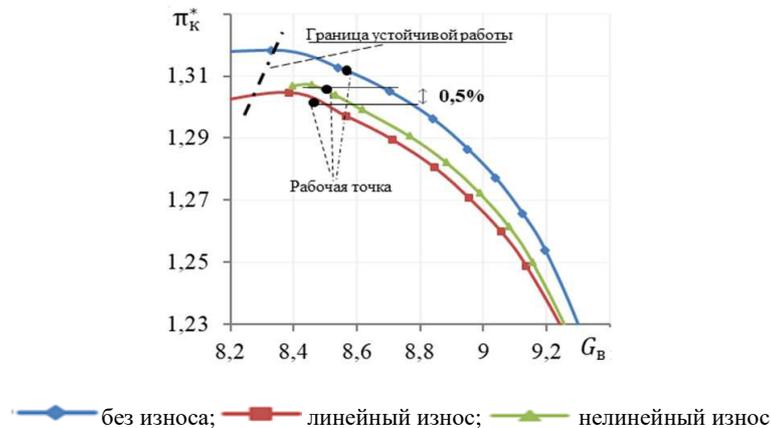
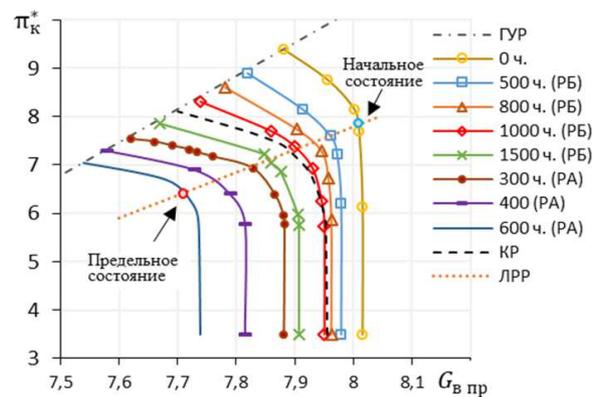


Рисунок 4. – Напорная характеристика входной ступени компрессора с различными видами износа



РБ – Республика Беларусь ( $PM = 40 \text{ мкг/м}^3$ ); РА – Республика Алжир ( $PM = 1400 \text{ мкг/м}^3$ ); ЛРР – линия рабочих режимов; Гур – граница устойчивой работы; КР – капитальный ремонт (РБ)

Рисунок 5. – Напорная характеристика компрессора при различной наработке  $t$  и запыленности атмосферы  $PM$

Проведенные исследования показали, что изменения газодинамических параметров до предельного состояния компрессора составляют  $\Delta K_y$  (44,12%) и  $\pi_k^*$  (18,5%),  $\eta_k^*$  (6,15%),  $G_{в пр}$  (5,35%). Таким образом, наиболее информативными параметрами для определения технического состояния компрессора при эрозивно-абразивном изнашивании его лопаток являются  $\Delta K_y$  и  $\pi_k^*$ .

В работе [2] доказана возможность определения  $\Delta K_y$  компрессора в эксплуатации с применением диагностических матриц. Однако в разработанной системе диагностических уравнений с учетом конструкции двигателя типа ТВЗ-117 используется функциональный параметр – температура газов перед турбиной двигателя  $T_T$ . Изменение  $T_T$  может быть вызвано не только ухудшением характеристики компрессора, но и неисправностью топливной автоматики и других элементов двигателя. Эти факты не дают адресности в постановке диагноза, а именно степень износа лопаток компрессора в эксплуатации. Таким образом, для контроля технического состояния компрессора при эрозивно-абразивном изнашивании его лопаток и определения остаточного ресурса компрессора в качестве основного газодинамического параметра двигателя предлагается использовать диагностический параметр  $\pi_k^*$ .

Анализ расчета газодинамических параметров компрессора показал, что увеличение износа лопаток по найденным зависимостям (см. рисунок 2) до предельного ( $b_{1 изн} > 2 \text{ мм}$ ) приводит к снижению границы устойчивой работы компрессора (см. рисунок 5) и, соответственно, к уменьшению  $\Delta K_y$ . При снижении  $\Delta K_y$  с 24,25% до 12,4% наблюдаются срывные явления в периферийной области лопаток 6–12-й ступеней, приводящие к воз-

никновению помпажа [4]. При этом предельное значение степени повышения давления воздуха в компрессоре  $\pi_{к.пр}^*$  составляет 6,5.

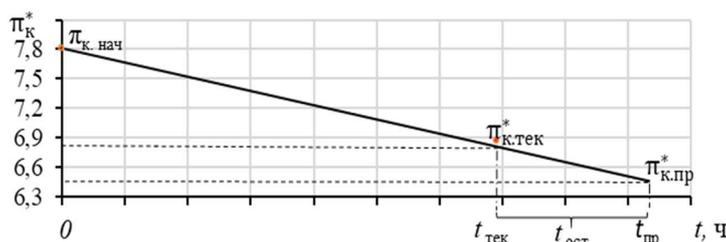
Исходя из полученной напорной характеристики компрессора, диагностический параметр  $\pi_k^*$ , рассчитывается как

$$\pi_k^* = 7,8 - 3,5 \cdot 10^{-4} \cdot PM - 3,4 \cdot 10^{-4} \cdot t - 2 \cdot 3,2 \cdot 10^{-7} \cdot t \cdot PM. \quad (1)$$

Связь между износом лопаток первой ступени компрессора  $b_{1изн}$  и  $\pi_k^*$  имеет вид:

$$b_{1изн} = 11,46 - 1,46 \cdot \pi_k^*, \quad (2)$$

Выражения (3) и (4) позволяют прогнозировать остаточный ресурс компрессора  $t_{ост}$  вертолетного ГТД типа ТВ3-117 с учетом региона его эксплуатации. На рисунке 6 показано снижение параметра  $\pi_k^*$  от наработки двигателя  $t$ .



$t_{пр}$  и  $t_{тек}$  – наработка двигателя до предельного состояния и в рассматриваемый момент времени (текущая), соответственно, ч;  $\pi_{к.нач}^*$ ,  $\pi_{к.тек}^*$  и  $\pi_{к.пр}^*$  – значения структурного показателя: начальное, текущее и предельное, соответственно

Рисунок 6. – Снижение диагностического параметра  $\pi_k^*$  от наработки двигателя  $t$

Остаточный ресурс компрессора рассчитывается как

$$t_{ост} = t_{пр} \cdot \frac{\pi_{к.тек}^* - \pi_{к.пр}^*}{\pi_{к.нач}^* - \pi_{к.пр}^*}. \quad (3)$$

Нарботка двигателя до предельного состояния компрессора определяется по выражению (3), где  $\pi_{к.пр}^*$  имеет значение 6,5. Таким образом,  $t_{пр}$  имеет вид:

$$t_{пр} = 3028 - 1,74 \cdot PM. \quad (4)$$

Выполнен сравнительный анализ достоверности определения  $\Delta K_y$  с использованием на сегодня структурного параметра  $b_{1изн}$  и предлагаемого в работе диагностического  $\pi_k^*$ . На основании расчетных данных газодинамических параметров компрессора проведен полнофакторный эксперимент, определяющий статистическую связь между исследуемыми параметрами с учетом капитального ремонта двигателя (рисунок 5) с заменой лопаток первой ступени компрессора (таблица 1).

Таблица 1. – Зависимости изменения  $\Delta K_y$  от износа лопаток первой ступени  $b_{1изн}$  и степени повышения давления воздуха в компрессоре  $\pi_k^*$

| Вид контроля              | Определение $\Delta K_y$                          |     | Коэффициент детерминации | Средняя ошибка аппроксимации |
|---------------------------|---------------------------------------------------|-----|--------------------------|------------------------------|
| По $b_{1изн}$             | $\Delta K_y = 23,3 - 7,18 b_{1изн}$               | (5) | 0,57                     | 11%                          |
| По $\pi_k^*$              | $\Delta K_y = -45,5 + 8,8 \pi_k^*$                | (6) | 0,956                    | 5%                           |
| По $b_{1изн}$ и $\pi_k^*$ | $\Delta K_y = -42,4 - 0,5 b_{1изн} + 8,4 \pi_k^*$ | (7) | 0,957                    | 4,7%                         |

Согласно таблице 1, параметр  $b_{1изн}$  имеет слабую корреляционную связь по отношению к  $\Delta K_y$  в отличие от  $\pi_k^*$ . В выражении (7) коэффициент при  $b_{1изн}$  статистически незначим при доверительной вероятности 0,05. Все это подтверждает слабую информативность структурного параметра  $b_{1изн}$  и, как следствие, низкую досто-

верность определения технического состояния компрессора при эксплуатации двигателей, прошедших капитальный ремонт.

Таким образом, методика контроля технического состояния компрессора при изнашивании его лопаток представляет собой допусковый контроль степени повышения давления компрессора с помощью разработанного средства контроля  $\pi_k^*$  двигателя типа ТВ3-117 и представлена в работе [2].

Качество диагностирования компрессора двигателя типа ТВ3-117 с применением разработанной методики было оценено главными показателями качества систем диагностирования, характеризующими полноту и глубину поиска дефекта, а также вторичным показателем времени поиска дефекта (таблица 2).

Таблица 2. – Сравнительный анализ показателей диагностирования компрессора

| Показатели диагностирования | До применения разработанной методики | С применением разработанной методики |
|-----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| $K_{п.п}$                   | 0,33                                 | 0,66                                 |
| $K_{ГП}$                    | 0,1                                  | 0,17                                 |
| $S_{д}$                     | 0,9                                  | 0,3                                  |

1. Коэффициент полноты проверки  $K_{п.п}$ :

$$K_{п.п} = n_k / n_o \quad (8)$$

2. Коэффициент безразборного диагностирования  $K_{БД}$ :

$$K_{БД} = F/R \quad (9)$$

3. Средняя трудоемкость диагностирования  $S_{д}$

$$S_{д} = \sum_{j=1}^N S_{дj}, \quad (10)$$

где  $n_k$  – число диагностических параметров;

$n_o$  – число параметров технического состояния, использование которых обеспечивает методическую достоверность проверки;

$F$  – число составных частей изделия, с точностью до которых определяется место дефекта;

$R$  – общее число составных частей изделия, с точностью до которых требуется определение места дефекта;

$S_{дj}$  – трудоемкость  $j$ -й операции диагностирования (чел.-ч).

**Заключение.** Проведенные в работе исследования позволили: обосновать значения основных газодинамических параметров и износа лопаток рабочего колеса компрессора и связей между ними, определяющих предельное состояние вертолетного газотурбинного двигателя типа ТВ3-117 и исключают возникновение помпажа при его работе; разработать методику определения остаточного ресурса компрессора, учитывающую регион эксплуатации вертолета, и средство для контроля степени повышения полного давления воздуха в компрессоре.

Полученные результаты свидетельствуют о достижении цели исследования, а именно, повышении качества со снижением трудоемкости диагностирования осевого компрессора вертолетного газотурбинного двигателя, что способствует поддержанию работы двигателя типа ТВ3-117 на высоком уровне надежности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лозинский Л.П., Янко А.К. Оценка технического состояния авиационных ГТД. – М.: Транспорт, 1982. – 160 с.
2. Санько А.А., Потапов В.А., Хованский Р.И. Диагностика технического состояния компрессора ГТД в процессе его эксплуатации по комплексному термогазодинамическому параметру // Авиацион. вестн. – 2020. – № 3. – С. 19–25.
3. Богданов А.Д., Калинин Н.П., Кривко А.И. Турбовальный двигатель ТВ3-117ВМ: конструкция и техническое обслуживание. – М.: Воздуш. транспорт, 2000. – 392 с.
4. Потапов В.А., Санько А.А., Кудин М.В. Зависимость термогазодинамических параметров работы компрессора вертолетного газотурбинного двигателя от его наработки и запыленности атмосферы // Изв. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2021. – Т. 57, № 3. – С. 307–319.
5. Павленко Д.В., Двирник Я.В. Закономерности изнашивания рабочих лопаток компрессора вертолетных двигателей, эксплуатирующийся в условиях запыленной атмосферы // Вестн. двигателестроения. – 2016. – № 1. – С. 42–51.
6. Потапов В.А., Санько А.А. Моделирование характеристик многоступенчатого осевого компрессора турбовального ГТД с учетом нелинейности эрозионного износа его лопаток // Науч. вестн. МГТУ ГА. – 2020. – Т. 23, № 5. – С. 39–53.

#### REFERENCES

1. Lozinskii, L.P. & Yanko, A.K. (1982). *Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya aviatsionnykh GTD*. Moscow: Transport. (In Russ.)

2. San'ko, A.A., Potapov, V.A. & Khovanskii, R.I. (2020). Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya kompressora GTD v protsesse ego ekspluatatsii po kompleksnomu termogazodinamicheskomu parametru [Diagnostics of the technical condition of the gas turbine engine compressor during its operation according to the complex thermogasdynamical parameter]. *Aviatsionnyi vestnik [Aviation Bulletin]*, (3), 19–25. (In Russ., abstr. in Engl.)
3. Bogdanov, A.D., Kalinin, N.P. & Krivko, A.I. (2000). *Turboval'nyi dvigatel' TVZ-117VM: konstruktziya i tekhnicheskoe obsluzhivanie*. Moscow: Vozdush. Transport. (In Russ.)
4. Potapov, V.A., San'ko, A.A. & Kudin, M.V. (2021). Zavisimost' termogazodinamicheskikh parametrov raboty kompressora vertoletnogo gazoturbinnoho dvigatelya ot ego narabotki i zapylennosti atmosfery [Dependence of the thermogasdynamical parameters of the compressor of a helicopter gas turbine engine on its operating time and dustiness of the atmosphere]. *Izvestiya Natsional'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fiz.-mat. nauk [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of Phys.-Math. Sciences]*, 57(3), 307–319. (In Russ., abstr. in Engl.)
5. Pavlenko, D.V. & Dvirnik, Ya.V. Zakonomernosti iznashivaniya rabochikh lopatok kompressora vertoletnykh dvigatelei, ekspluatiruyushchiysya v usloviyakh zapylennoi atmosfery [Patterns of wear of rotor blades of a helicopter engine compressor operating in a dusty atmosphere]. *Vestnik dvigatelestroeniya [Bulletin of engine building]*, (1), 42–51. (In Russ., abstr. in Engl.)
6. Potapov, V.A. & San'ko, A.A. (2020). Modelirovanie kharakteristik mnogostupenchatogo osevoho kompressora turboval'nogo GTD s uchedom nelineinosti erozionnogo iznosa ego lopatok [Modeling of the characteristics of a multistage axial compressor of a turboshaft gas turbine engine taking into account the nonlinearity of the erosive wear of its blades]. *Nauchnyi vestnik MGTU GA [Scientific Bulletin MSTU GA]*, 23(5), 39–53. (In Russ., abstr. in Engl.)

Поступила 16.05.2023

## IMPROVING THE QUALITY OF DIAGNOSTICS OF AN AXIAL COMPRESSOR OF A HELICOPTER GAS TURBINE ENGINE

V. POTAPOV, A. SANKO  
(Belarusian State Aviation Academy, Minsk)

*The aim of the work is to improve the quality with a decrease in the complexity of diagnosing an axial compressor of a helicopter gas turbine engine with erosive-abrasive wear of its blades. Regularities of changes in the structural and diagnostic parameters of the compressor depending on the operating time and the region of operation of the engine are revealed. The values of the main gas-dynamic parameters and the wear of the compressor blades and the links between them, which determine the limiting state of the TV3-117 type helicopter gas turbine engine, are substantiated. A method for determining the residual life of the compressor is proposed, taking into account the region of operation of the helicopter. The quality of compressor diagnostics was assessed using the gas-dynamic parameters of a helicopter gas turbine engine in operation.*

**Keywords:** diagnostics, gas turbine engine, axial compressor, blade wear, stability margin, surging, residual life, dependencies of gas dynamic parameters.

**ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ**

УДК 622.691.4:004.422.83

DOI 10.52928/2070-1616-2023-48-2-66-69

**ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ, ВОЗМОЖНОСТИ И ОПЫТ АПРОБАЦИИ  
ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ  
«ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ (ПОВЕРОЧНЫЙ) РАСЧЕТ ГАЗОПРОВОДОВ»****Н.В. СТРУЦКИЙ**

(ГПО «Белтонгаз», Минск)

**С.И. МОРОЗОВ**

(УП «Витебскоблгаз», Витебск)

канд. физ.-мат. наук, доц. **О.В. ГОЛУБЕВА**, канд. экон. наук, доц. **С.В. БОСЛОВЯК**,**А.Н. ЯНУШОНОК**

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

*Надежная и эффективная эксплуатация газораспределительных трубопроводных систем обеспечивается в т.ч. с помощью использования автоматизированных информационных систем, имеющих функции контроля и сопровождения производимых работ, ситуационного анализа, прогнозирования режимов и состояния газораспределительных систем. Важной составляющей, обеспечивающей гибкость и скорость развития систем газоснабжения, является моделирование режимов работы существующих газораспределительных трубопроводных систем с целью определения технических возможностей и поиска оптимальных точек подключения будущих потребителей газа.*

*В статье рассматриваются принципы построения и возможности созданного в период 2021-2022 гг. инновационного цифрового продукта – программного модуля «Гидравлический (поверочный) расчет газопроводов», интегрированного в Единую автоматизированную систему Государственного производственного объединения по топливу и газификации «Белтонгаз».*

**Ключевые слова:** программный модуль, моделирование гидравлических процессов, система газоснабжения, автоматизированная информационная система.

**Введение.** Как известно, развитие газораспределительных систем территорий осуществляется на основании расчетных схем газоснабжения городов и населенных пунктов, утвержденных в установленном порядке [1].

Разработку гидравлических расчетных схем газоснабжения осуществляют компетентные проектные организации с учетом перспективного газопотребления. Для этих целей имеется широкий выбор специализированного программного обеспечения. Например, ИГС «CityCom-ГазГраф», ZuluGaz, АСПО-ГАЗ таких известных разработчиков, как ИВЦ «Поток» (Москва), ООО «Политерм» (Санкт-Петербург), ЗАО «АСПО» (Санкт-Петербург).

Разработанная в Государственном производственном объединении по топливу и газификации (далее – ГПО) «Белтонгаз» расчетная схема развития газоснабжения является документом высокого уровня, определяющим параметры локальных газораспределительных систем на длительный период (как правило, до 10 лет). Вместе с тем современная динамика роста производственных мощностей, предполагающая сжатые сроки реализации инвестиционного цикла (3–5 лет) даже для крупных промышленных предприятий с соответствующим газопотреблением, зачастую опережает заложенные схемами газоснабжения возможности газовых сетей. Уровень таких схем не предполагает детализации газопотребления до масштабов, например, небольшого сельского поселения, улицы, садового товарищества. Эти вопросы регулярно решаются специалистами проектно-технических отделов газоснабжающих организаций при осуществлении деятельности по выдаче технических условий на подключение к существующим газопроводам по заявкам будущих потребителей газа. Эта работа включает предварительную оценку соответствия возможных технических решений действующей территориальной схеме газоснабжения и влияния добавляемого объема газопотребления на гидравлический режим газораспределительной сети, определение оптимальной точки подключения конкретного потребителя. При этом активное развитие систем газоснабжения может привести к изменениям, способным генерировать необходимость существенной переработки действующей схемы газоснабжения или разработки новой.

Решение данной задачи на текущий момент возможно следующими способами: ручной пересчет схемы газоснабжения; экспертная оценка, основанная на опыте эксплуатирующего персонала газоснабжающей организации; обращение к сторонним организациям, проектирующим схемы газоснабжения. Представленные подходы имеют существенные недостатки: большие временные или финансовые затраты, неточность получаемых режимов работы сетей газораспределения. Таким образом, поставленная задача по моделированию режимов работы газовых сетей и помощи в принятии решений по оценке возможности подключения

новых потребителей газа к существующим сетям требует разработки специализированного модуля поверочных гидравлических расчетов. Программный модуль «Гидравлический (поверочный) расчет газопроводов» задуман для помощи специалисту эксплуатирующей организации и не затрагивает сферу проектирования. Одно из требований к разработке программного модуля – его интеграция в существующую систему автоматического управления, находящуюся в эксплуатации ГПО «Белтопгаз».

**Основная часть.** Реализация решения поставленных задач проводилась в рамках проведения глубокой цифровой трансформации газораспределительной системы Республики Беларусь ГПО «Белтопгаз».

Ключевым аспектом при решении данных задач выступает многоуровневая координация между техническими специалистами и руководителями аппарата управления и газоснабжающих организаций объединения – «коллективным заказчиком» цифровизации, и филиалом Производственного управления (далее – ПУ) «АйТи-Газ» УП «Витебскоблгаз» – базовой отраслевой организацией в области развития IT-технологий.

На сегодня создана и устойчиво функционирует Единая автоматизированная система (ЕАС) ГПО «Белтопгаз», обеспечивающая цифровое сопровождение всех без исключения сфер деятельности, а, в особенности, производственно-технической сферы<sup>1</sup>.

Основу ЕАС составляют три взаимодополняющих мультипрограммных комплекса (далее – МПК):

- МПК «Мириада» – цифровое сопровождение непосредственных производителей работ по техническому обслуживанию объектов газораспределения и газопотребления с помощью мобильных приложений;
- МПК «Панорама» – главный интегратор всего массива накопленной информации (Big Data), визуализация газораспределительной системы во всей ее совокупности в виде электронной карты;
- МПК «Вершина» – итоговая аналитика на уровне аппаратов управления газоснабжающих организация и объединения, руководства отрасли.

Данные комплексы полностью совместимы и увязаны как в части внутренней архитектуры, так и между собой, что обеспечивает системный подход к обеспечению автоматизации технологических процессов. Структурная схема организации работы трехуровневой системы мультипрограммных комплексов «Мириада», «Панорама», «Вершина» показана на рисунке 1.

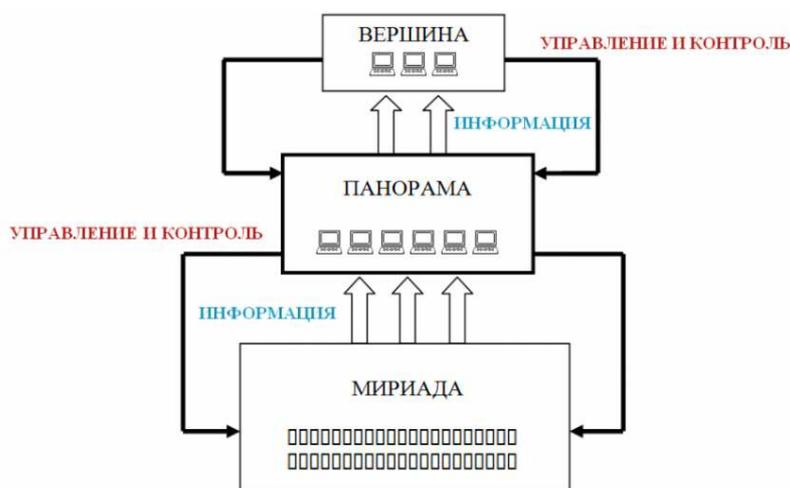


Рисунок 1. – Трехуровневая система МПК

Согласно представленному рисунку 1, первичная информация из мобильных приложений непосредственных производителей работ эксплуатирующих организаций интегрируется в МПК «Панорама». Далее на основе анализа большого массива накопленной информации МПК «Вершина» проводится итоговый анализ. Ключевым звеном системы является МПК «Панорама», охватывающий весь цикл эксплуатации объектов газораспределительной системы и обеспечивающий автоматизацию широкого набора технологических процессов.

В основу МПК «Панорама» заложены следующие идеи:

- создание отдельного программного модуля (далее – ПМ) для каждой технической службы или отдельного крупного технологического процесса;
- интеграция данных программных модулей на единой электронной карте газораспределительной системы;
- гибкость и открытость архитектуры программного продукта, обеспечивающие легкую масштабируемость и доступность для постоянного развития и модернизации.

<sup>1</sup> СН 4.03.01-2019. Газораспределение и газопотребление. – Введ. 26.12.2019. – Минск: Минкстройархитектуры 2020. – 106 с.

Соответственно, МПК «Панорама» прирастает возможностями как за счет доработки существующих модулей, так и внедрения новых. Последним по времени разработки программным модулем МПК «Панорама» стал ПМ «Гидравлический (поверочный) расчет газопроводов», разработанный Производственным управлением «АйТиГаз» в течение 2021–2022 гг. по техническому заданию управления систем газоснабжения и рабочей группы начальников производственно-технических отделов газоснабжающих организаций ГПО «Белтопгаз».

Визуальная подоснова модуля – специальный, совместимый с основной электронной картой МПК «Панорама», графический слой, где предусмотрена возможность нанесения перспективных потребителей (с задаваемыми параметрами требуемых расхода и давления газа) и газопроводов для дальнейшего моделирования режимов работы вновь созданных сетей (рисунок 2).

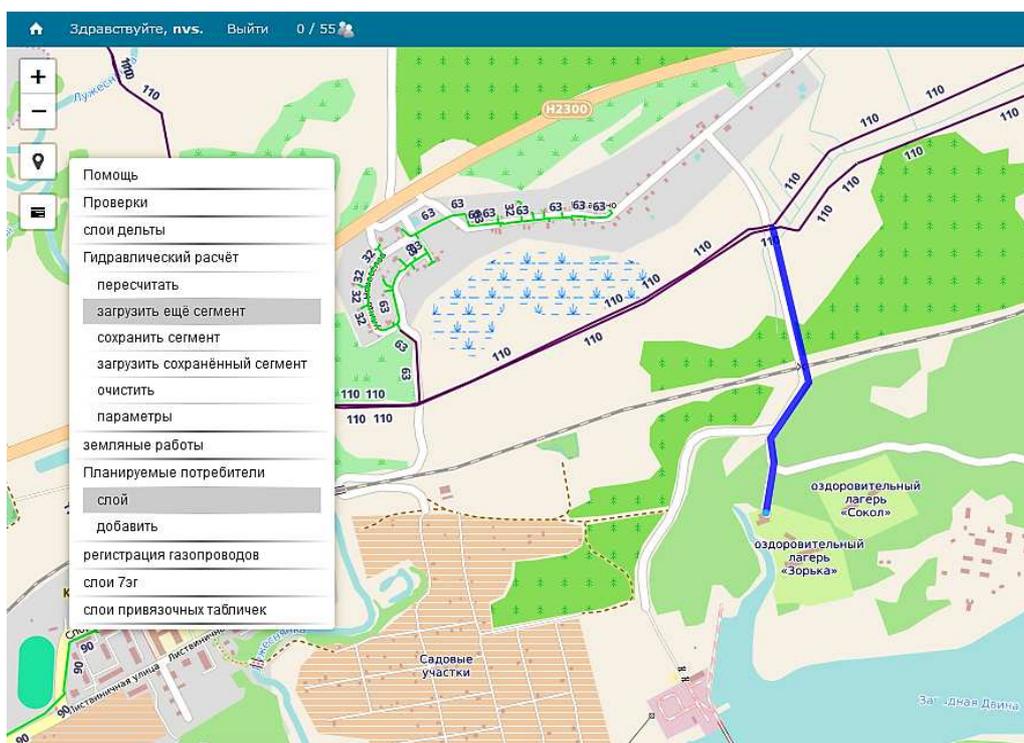


Рисунок 2. – Нанесение перспективного потребителя газа на электронную карту

Таким образом, в расчетную схему, которая уже включает и учитывает фактические параметры всех эксплуатируемых объектов, в интерактивном режиме вносятся желаемые изменения и далее производится математическое моделирование отредактированной схемы газоснабжения. Математическая модель, заложенная в основу программного модуля, представлена системой уравнений, описывающих стационарный режим работы газопроводов. Формируемая система уравнений на основе уравнений баланса потоков газа в узлах как функции давлений в соответствующих направлениях потоков минимизирует суммарный дисбаланс всей системы и позволяет получить распределение давлений и расходов по заданной системе распределительных газопроводов. Заложенный в программный модуль алгоритм гидравлического расчета соответствует нормативным требованиям<sup>2</sup> [1]. Для проверки адекватности изложенной модели использовалось сравнение полученных значений с расчетами, выполненными проектной организацией (ГП «НИИ Белгипротопгаз»). Проверка осуществлялась на примере газораспределительных сетей гг. Орши и Жлобина. Результаты расчетов, выполненных с помощью модуля «Гидравлический (поверочный) расчет газопроводов», показали полную сходимость с результатами, полученными в ходе разработки схем газоснабжения указанных городов ГП «НИИ Белгипротопгаз».

Заложенный в программный модуль «Гидравлический (поверочный) расчет газопроводов» функционал предоставляет возможности:

- интерактивного моделирования стационарных режимов работы газопроводов с целью быстрой проработки возможных вариантов подключения перспективных потребителей, а также соединения сегментов сети с помощью перемычек и закольцовок;

- произвольного выбора и расчета локальных сегментов существующих газораспределительных сетей с целью общего анализа и выявления слабых звеньев системы по пропускной способности (для участков

<sup>2</sup> СП 42-101-2003. Общие положения по проектированию и строительству газораспределительных систем из металлических и полиэтиленовых труб. – Введ. 08.07.2003. – М: ЗАО «Полимергаз», 2006. – 166 с.

газопровода) и производительности (для источников газоснабжения – газорегуляторных пунктов, шкафных регуляторных пунктов);

– наглядного отображения расчетных давлений и скоростей потоков газа, точек схождения потоков газа от разных источников в целях анализа гидравлического режима.

Модуль обеспечивает формирование, сохранение и вывод на печать полученных расчетных (поверочных) схем и результатов расчета в табличном виде.

Учитывая отсутствие у специалистов эксплуатационно-технического профиля опыта использования специализированного программного обеспечения для гидравлических расчетов, ПУ «АйТиГаз» создано обучающее видеопособие, позволяющее в короткие сроки получить навыки работы с внедряемым программным модулем.

Для удовлетворения повышенных требований к производительности вычислительной техники в газоснабжающих организациях созданы специально выделенные под эти цели виртуальные машины (минимальные технические параметры: серверный процессор 10 ядер, HDD 20 GB, ОЗУ 10 GB) для переноса на них расчетных операций.

В настоящее время программный модуль успешно прошел апробацию, УП «Научная организация труда» подготовлены соответствующие изменения в отраслевой нормативный документ<sup>3</sup>, определяющие порядок применения ПМ «Гидравлический (поверочный) расчет газопроводов» в производственной практике.

**Заключение.** Производственным управлением «АйТиГаз» УП «Витебскоблгаз» разработан и внедрен инновационный программный модуль «Гидравлический (поверочный) расчет газопроводов», позволяющий повысить компетенции технических специалистов и руководителей газоснабжающих организаций. Этот модуль обеспечивает новое качество деятельности по выдаче технических условий на подключение к газораспределительной системе, своевременное планирование и разработку (в т.ч. переработку) территориальных схем развития газоснабжения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Струцкий Н.В., Васильев В.Ю. Единая автоматизированная система ГПО «Белтопгаз». От идеи к результату // Энергетическая стратегия. – 2017. – № 3(57). – С. 52–55.

#### REFERENCES

1. Strutski, N.V. & Vasil'ev, V.Yu. (2017). Edinaya avtomatizirovannaya sistema GPO «Beltopgaz». Ot idei k rezul'tatu [Unified automated system of State Production Association “Beltopgaz”. From idea to result]. *Energeticheskaya strategiya [Energy strategy]*, 3(57), 52–55. (In Russ., abstr. in Engl.)

Поступила 28.08.2023

### PRINCIPLES OF CONSTRUCTION, POSSIBILITIES AND EXPERIENCE OF TESTING THE SOFTWARE MODULE "HYDRAULIC (VERIFICATION) CALCULATION OF GAS PIPELINES"

**N. STRUTSKY**

*(State Production Association for Fuel and Gasification "Beltopgaz", Minsk)*

**S. MOROZOV**

*(Unitary enterprise "Vitebskoblgaz", Vitebsk)*

**O. GOLUBEVA, S. BOSLOVYAK, A. YANUSHONOK**

*(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)*

*Reliable and efficient operation of gas distribution pipeline systems is ensured, among other things, through the use of automated information systems that have the functions of monitoring and supporting work performed, situational analysis, forecasting the modes and conditions of gas distribution systems. An important component that ensures the flexibility and speed of development of gas supply systems is the modeling of operating modes of existing gas distribution pipeline systems in order to determine the technical capabilities and find the optimal connection points for future gas consumers.*

*The article highlights the principles of construction and the possibilities of an innovative digital product created in the period of 2021–2022 – the software module "Hydraulic (verification) calculation of gas pipelines", integrated into the Unified Automated System of the State Production Association for Fuel and Gasification "Beltopgaz".*

**Keywords:** software module, simulation of hydraulic processes, gas supply system, automated information system.

<sup>3</sup> СТП 01.01-2019. Порядок выдачи технических условий на присоединение объектов газопотребления к газораспределительной системе. – Введ. 20.05.2019. – Минск, 2019. – 16 с.

УДК 676.017

DOI 10.52928/2070-1616-2023-48-2-70-74

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ ПРОСВЕТА БУМАГИ РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ**

*д-р хим. наук, проф. М.А. ЗИЛЬБЕРГЛЕЙТ, И.В. МАРЧЕНКО*  
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

*Исследованы равномерности просвета офисных бумаг различных классов и марок. Потребность в детальном изучении структуры офисной бумаги вызвано большим количеством дефектов, возникающих в процессе печати. Чтобы получать качественное изображение при высоких и средних скоростях оборудования и минимальных затратах, необходимо знать структурные свойства бумаги и уметь управлять ими.*

*Оценка, изучение и характеристика факторов, которые, как предполагается, влияют на взаимодействие между чернилами струйной печати и поверхностью офисной бумаги, могут быть выполнены с помощью метода экспертных оценок. В статье описывается экспертный метод определения просвета, основанный на органолептическом восприятии просвета бумаги группой лиц. В процессе работы были определены образцы бумаги, имеющие лучшие показатели просвета. Полученные в работе результаты могут быть применены в практической деятельности типографий для правильного выбора материала при печати. Данный метод оценки уровня качества бумаги позволяет предприятию быстро реагировать на проблемы, связанные с печатью и дальнейшей обработкой полиграфических изделий.*

**Ключевые слова:** *офисная бумага, равномерность просвета, экспертный метод, микроструктура бумаги, коэффициент конкордации.*

**Введение.** Качество продукции – это совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением<sup>1</sup>.

Повышение требований к печатным свойствам материалов и качеству печатного оттиска становится более актуально в настоящее время. Развитие технологии струйной печати позволяет внедрять новые технологические решения, совершенствовать используемые материалы: чернила и бумагу. Повышаются требования к качеству бумаги, главным образом это касается степени ее белизны, улучшения и повышения равномерности поверхностных свойств и гладкости. Большое влияние на качество печати оказывают технические характеристики бумаги, в первую очередь ее печатные свойства.

**Основная часть.** Выбирая бумагу для струйного принтера, необходимо обратить внимание на ее структуру. Равномерное поглощение чернил и быстрое их высыхание характеризует качество запечатываемого материала.

Просвет бумаги характеризует степень однородности ее структуры, т.е. степень равномерности распределения в ней волокон. О просвете судят по наблюдению бумаги в проходящем свете. При этом бумага просвечивает, и можно легко наблюдать, насколько она оптически однородна. Облачность бумаги, т.е. наличие в ней светлых и темных мест, свидетельствует о недостаточно равномерном расположении в бумаге волокон и ее неравномерной толщине. Бумага с сильно облачным просветом крайне неоднородна. Ее тонкие места менее прочны и оказывают меньшее сопротивление прохождению чернил. Печать на облачной бумаге, особенно иллюстрационная, оказывается низкого качества из-за неравномерности восприятия бумагой печатной краской [1].

По данным Р.Э. Рейзинша, при неоднородной структуре бумаги, о чем свидетельствует ее неравномерный просвет, снижаются показатели механической прочности бумаги: разрывной длины – на 40%, сопротивлений излому и надрыву – в 2–2,5 раза [1].

**Цель работы** – исследование равномерности просвета офисной бумаги различных классов и марок. В данном случае использовался экспертный метод определения просвета, основанный на органолептическом восприятии просвета бумаги группой лиц.

Экспертный метод определения показателей качества продукции – метод определения значений показателей качества продукции, осуществляемый на основе решения, принимаемого экспертами<sup>1</sup>. Он основан на использовании обобщенного опыта и интуиции специалистов, и его следует использовать, когда для решения задач по оценке уровня качества невозможно или затруднительно использовать более объективные методы, например, измерительный или расчетный [2].

<sup>1</sup> ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 01.07.1979. – М.: Стандартинформ, 2009. – 21 с.

Существует ряд литературных источников, описывающих взаимодействие краски с бумагами для офсетной, высокой и глубокой печати. В цифровых технологиях для печати текстов и документации на струйных и лазерных принтерах используется офисная бумага, свойства которой недостаточно изучены<sup>2</sup>.

Основными показателями офисной бумаги согласно техническим условиям являются белизна и толщина, но эти свойства – не единственное, на что стоит обращать внимание.

Для оценки равномерности просвета офисной бумаги с помощью экспертного метода была создана экспертная комиссия из квалифицированных специалистов в полиграфической области. Число экспертов, входящих в группу, зависело от требуемой точности средних оценок, трудоемкости оценочных процедур, – 11 специалистов.

Для получения достаточно точных результатов были приняты меры по уменьшению субъективности, присущей экспертному методу. С этой целью было проведено три тура опроса.

Эксперты могут выражать свое мнение не только непосредственным измерением весовых коэффициентов, но и в форме ранжирования объектов.

Ранжирование заключается в расстановке объектов измерения или показателей качества в порядке их предпочтения, важности или весомости. Место, занятое при такой расстановке, называется рангом. Чем выше ранг, тем предпочтительнее объект, весомее, важнее показатель.

Объектом исследования были по 3 образца офисной бумаги массой 80 г/м<sup>2</sup>, выпускаемой разными производителями: класс А марки «Навигатор», «Элита», «Балет», класс В марки «IQ» и класс С марки «IQ» и «Снегурочка».

Для фиксирования облачности были получены фотоснимки бумаги на просвет, после чего оцифрованы и подготовлены для изучения экспертами.

Эксперты в три этапа расставили исследуемые образцы офисной бумаги в порядке предпочтения, причем образец с худшим просветом получал ранг, равный 1, с наилучшим – 6.

Степень согласованности экспертов оценивается коэффициентом конкордации. Коэффициент конкордации рассчитывается по результатам самостоятельной работы экспертов по приведенному ниже алгоритму. Полученные ранги по каждому объекту в первом туре заносятся в итоговую таблицу 1.

Таблица 1. – Значения первого тура

| № образца<br><i>m</i> | Эксперты, <i>n</i> |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | Сумма<br>рангов | Среднее<br>значение<br>$\sum_{cp}$ | Отклонение<br>от среднего<br>$\Delta$ | Квадраты<br>отклонения<br>$\Delta^2$ |
|-----------------------|--------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----------------|------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
|                       | 1                  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 |                 |                                    |                                       |                                      |
| 1                     | 6                  | 6  | 6  | 5  | 6  | 6  | 5  | 6  | 4  | 5  | 6  | 61              | 35,5                               | 25,5                                  | 650,25                               |
| 2                     | 5                  | 5  | 5  | 3  | 4  | 5  | 4  | 4  | 3  | 3  | 5  | 46              |                                    | 10,5                                  | 110,25                               |
| 3                     | 3                  | 3  | 4  | 3  | 3  | 4  | 3  | 5  | 2  | 4  | 4  | 38              |                                    | 2,5                                   | 6,25                                 |
| 4                     | 4                  | 1  | 3  | 2  | 5  | 2  | 3  | 1  | 1  | 2  | 1  | 25              |                                    | -10,5                                 | 110,25                               |
| 5                     | 2                  | 4  | 2  | 2  | 2  | 3  | 2  | 3  | 2  | 2  | 3  | 27              |                                    | -8,5                                  | 72,25                                |
| 6                     | 1                  | 2  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 2  | 2  | 2  | 2  | 16              |                                    | -19,5                                 | 380,25                               |
| Сумма                 | 21                 | 21 | 21 | 16 | 21 | 21 | 18 | 21 | 14 | 18 | 21 | 213             |                                    | $S = 1329,5$                          |                                      |

Далее необходимо:

1. Определить сумму рангов (найти  $\sum$  значений) по каждому эксперту.
2. Определить среднее арифметическое значение суммы рангов для каждого образца

$$\frac{\sum 1 + \sum 2 + \sum 3 + \sum 4 + \sum 5 + \sum 6}{6},$$

где 6 – количество образцов изделия в экспертной группе.

3. Определить отклонение от среднего значения

$$\Delta = \sum \text{рангов} - \text{сред.}$$

где  $\Delta$  – отклонение.

4. Определить квадраты отклонений (возвести отклонение в квадрат).
5. Найти коэффициент конкордации по формуле

$$W = \frac{12S}{n^2(m^3 - m)}, \quad (1)$$

<sup>2</sup> Марченко И.В., Зильберглейт М.А., Камлюк Т.В. Оценка впитывающей способности офисных бумаг // Принттехнологии и медиакommunikации: материалы 86-й науч.-техн. конф. / Минск (31 янв. – 12 февр. 2022 г.). – Минск: БГТУ, 2022. – С. 21–23.

где  $S$  – сумма квадратов отклонений всех оценок рангов каждого объекта экспертизы от среднего значения;  
 $n$  – число экспертов;  
 $m$  – число объектов экспертизы.

$$W = \frac{12 \cdot 1329,5}{11^2 (6^3 - 6)} = \frac{15\,954}{25\,410} = 0,63.$$

Коэффициент конкордации изменяется в диапазоне  $0 < W < 1$ , где 0 – полная несогласованность между экспертами; 1 – полная согласованность. Принято считать, что согласованность удовлетворительна при  $W = 0,5-0,7$ ; хорошая при  $W > 0,7$ ; неудовлетворительна при значениях  $W < 0,5$ .

Значение коэффициента конкордации 0,63, значит, степень согласованности экспертов можно считать удовлетворительной.

По результатам экспертного опроса (см. таблицу 1) лучший просвет имеют образцы № 1, удовлетворительный – № 2. Остальные образцы признаны неудовлетворительными по качеству просвета (№№ 3, 4, 5, 6).

Для наглядности результатов исследования можно построить диаграмму сумм рангов (рисунок 1), по оси абсцисс которой будет перечень офисной бумаги, а по оси ординат сумма рангов, выставленных экспертами.

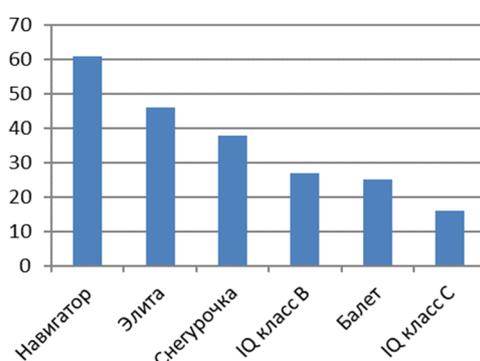


Рисунок 1. – Диаграмма сумм рангов по каждому виду бумаги, предложенному экспертам для анализа в первом туре

Основание ранжирования – это то свойство, по которому объекты упорядочиваются. В результате упорядочения получаем ранжированный ряд. В нем каждому объекту приписывается ранг – место в этом ряду. Число мест и, соответственно, число рангов равно числу объектов. На этапе ранжирования бумаги с наиболее равномерным просветом получили наибольший, в числовом выражении, ранг. В диаграмме они будут отражены более высокими столбцами: «Навигатор», «Элита», «Снегурочка».

Второй тур проводится аналогично первому, вне зависимости от значения коэффициента конкордации (таблица 2).

Таблица 2. – Значения второго тура

| № образца<br>$m$ | Эксперты, $n$ |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | Сумма<br>рангов | Среднее<br>значение<br>$\Sigma_{cp}$ | Отклонение<br>от среднего<br>$\Delta$ | Квадраты<br>отклонения<br>$\Delta^2$ |
|------------------|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
|                  | 1             | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 |                 |                                      |                                       |                                      |
| 1                | 4             | 2  | 5  | 5  | 4  | 5  | 3  | 4  | 5  | 5  | 5  | 47              | 38,5                                 | 8,5                                   | 72,25                                |
| 2                | 6             | 6  | 6  | 6  | 6  | 6  | 6  | 6  | 6  | 5  | 6  | 65              |                                      | 26,5                                  | 702,25                               |
| 3                | 1             | 1  | 1  | 1  | 1  | 3  | 2  | 1  | 1  | 1  | 1  | 14              |                                      | -24,5                                 | 600,25                               |
| 4                | 5             | 5  | 4  | 4  | 5  | 2  | 5  | 5  | 4  | 4  | 4  | 47              |                                      | 8,5                                   | 72,25                                |
| 5                | 3             | 4  | 2  | 2  | 2  | 1  | 2  | 3  | 2  | 3  | 3  | 27              |                                      | -11,5                                 | 132,25                               |
| 6                | 2             | 3  | 3  | 3  | 3  | 4  | 3  | 2  | 3  | 3  | 2  | 31              |                                      | -7,5                                  | 56,25                                |
| Сумма            | 21            | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 231             |                                      | $S = 1635,5$                          |                                      |

$$W = \frac{12 \cdot 1635,5}{11^2 (6^3 - 6)} = \frac{19\,626}{25\,410} = 0,77.$$

Значение коэффициента конкордации 0,77, значит, степень согласованности экспертов можно считать достаточно высокой.

Расчет коэффициента конкордации подтвердил согласованность мнений экспертов. По результатам экспертного опроса (см. таблицу 2) лучший просвет имеют образцы № 2, удовлетворительный – № 1 № 4. Остальные образцы признаны неудовлетворительными по качеству просвета (№№ 3, 5, 6, причем самый низкий ранг у образца № 3).

Для наглядности результатов второго тура исследования строим диаграмму сумм рангов (рисунок 2).

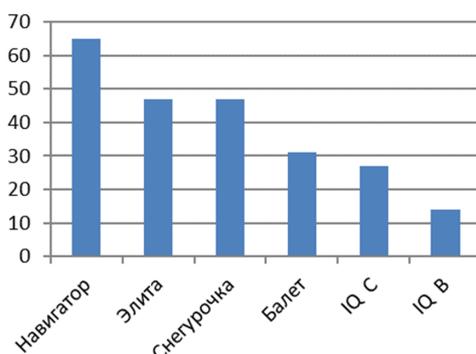


Рисунок 2. – Диаграмма сумм рангов по каждому виду бумаги, предложенному экспертам для анализа во втором туре

Второй тур проводится аналогично первому (таблица 3). В каждом туре номера образцов менялись для получения более точных и правильных результатов.

Таблица 3. – Значения третьего тура

| № образца<br><i>m</i> | Эксперты, <i>n</i> |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | Сумма рангов | Среднее значение<br>$\Sigma_{cp}$ | Отклонение от среднего<br>$\Delta$ | Квадранты отклонения<br>$\Delta^2$ |
|-----------------------|--------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
|                       | 1                  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 |              |                                   |                                    |                                    |
| 1                     | 2                  | 2  | 1  | 2  | 4  | 2  | 2  | 3  | 3  | 1  | 4  | 26           | 38,5                              | -12,5                              | 156,25                             |
| 2                     | 3                  | 3  | 3  | 1  | 1  | 1  | 1  | 2  | 2  | 2  | 2  | 21           |                                   | -17,5                              | 306,25                             |
| 3                     | 4                  | 5  | 5  | 4  | 3  | 3  | 5  | 5  | 5  | 5  | 1  | 45           |                                   | 6,5                                | 42,25                              |
| 4                     | 1                  | 1  | 2  | 3  | 2  | 5  | 3  | 1  | 1  | 3  | 3  | 25           |                                   | -13,5                              | 182,25                             |
| 5                     | 5                  | 4  | 4  | 5  | 5  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 5  | 48           |                                   | 9,5                                | 90,25                              |
| 6                     | 6                  | 6  | 6  | 6  | 6  | 6  | 6  | 6  | 6  | 6  | 6  | 66           |                                   | 27,5                               | 756,25                             |
| Сумма                 | 21                 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 231          |                                   | $S = 1533,5$                       |                                    |

$$W = \frac{12 \cdot 1533,5}{11^2 (6^3 - 6)} = \frac{18\ 402}{25\ 410} = 0,72.$$

Значение коэффициента конкордации 0,72, значит, степень согласованности экспертов можно считать достаточно высокой.

Расчет коэффициента конкордации подтвердил согласованность мнений экспертов. По результатам экспертного опроса (см. таблицу 3) лучший просвет имеют образцы № 6, удовлетворительный – № 3 и № 5. Остальные образцы признаны неудовлетворительными по качеству просвета (№№ 1, 2, 4, причем самый низкий ранг у образца № 2).

Для наглядности результатов исследования можно построить диаграмму сумм рангов (рисунок 3).

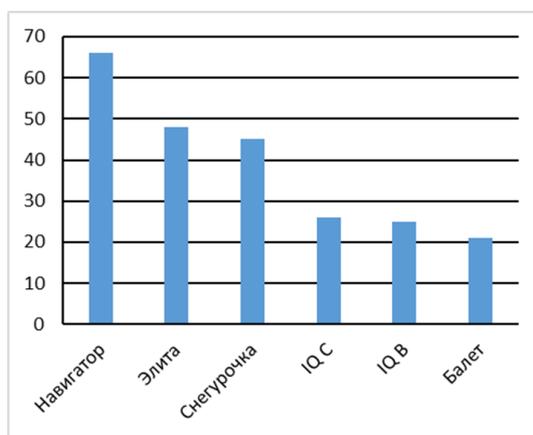


Рисунок 3. – Диаграмма сумм рангов по каждому виду бумаги, предложенному экспертам для анализа в третьем туре

Таким образом, при определении просвета офисной бумаги экспертным методом после расчета коэффициента конкордации была подтверждена согласованность мнений экспертов.

**Заключение.** Анализируя результаты проведенных исследований методом экспертного опроса по гистограммам можно увидеть, что однозначно лучший просвет имеет образец офисной бумаги класса А «Навигатор», удовлетворительный – «Элита» класса А и «Снегурочка» класса С. Остальные образцы признаны неудовлетворительными по качеству просвета: «Балет» класса А, «IQ» класса В и «IQ» класса С

Как уже не раз отмечалось, бумага марки «Снегурочка», несмотря на формальное отношение к классу бумаг С, мало чем уступает по качеству бумаге класса А, а в некоторых случаях даже превосходит некоторые из них.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Флягге Д.М. Свойства бумаги. – М.: Лес. пром-сть, 1970. – С. 186–230.
2. Управление качеством: учеб. / С.А. Зайцев, И.Е. Парфеньева, О.Ф. Вячеславова и др. – Новосибирск: СибАК, 2016. – 468 с.

#### REFERENCES

1. Flyatte, D.M. (1970). *Svoistva bumagi*. Moscow: Lesnaya promyshlennost'. (In Russ.)
2. Zaitsev, S.A., Parfen'eva, I.E., Vyacheslavova, O.F., Blinkova, E.S. & Lartseva, T.A. (2016). *Upravlenie kachestvom*. Novosibirsk: SibAK. (In Russ.)

Поступила 12.06.2023

### DETERMINATION OF PAPER LUMEN UNIFORMITY DIFFERENT CLASSES

**M. ZILBERGLEIT, I. MARCHENKO,**  
(Belarusian State Technological University, Minsk)

*In this paper, a study was made of the uniformity of the clearance of office papers of various classes and brands. The need for a detailed study of the structure of office paper is caused by a large number of defects that occur during the printing process. To obtain high-quality images at high and medium speeds of equipment and at minimal cost, it is necessary to know the structural properties of paper and be able to control them.*

*Evaluation, study and characterization of the factors that are believed to influence the interaction between inkjet ink and the surface of office paper can be performed using the method of expert judgment. The article describes an expert method for determining the gap, based on the organoleptic perception of the paper gap by a group of people. In the process of work, paper samples with the best lumen performance were identified. The results obtained in the work can be applied in the practice of printing houses for the correct choice of material for printing. This method of assessing the level of paper quality allows the company to quickly respond to problems associated with printing and further processing of printed products.*

**Keywords:** office paper, lumen uniformity, expert method, paper microstructure, concordance coefficient.

УДК 665.637.8

DOI 10.52928/2070-1616-2023-48-2-75-79

## МОДИФИЦИРОВАНИЕ БИТУМНЫХ ВЯЖУЩИХ ОТХОДАМИ НЕФТЕХИМИИ

*канд. техн. наук, доц. Ю.А. БУЛАВКА, К.А. ГРИШАНИН, В.С. СЛЕПЕНКОВ, Е.А. СТЕЛЬМАХ*  
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

*Выполнен анализ возможности использования шлама производства сульфонатной присадки и низкомолекулярного полиэтилена для модифицирования битумных материалов. Установлено, что совместное влияние компонентов предлагаемой комбинированной добавки на структуру битумного вяжущего позволяет повысить его теплостойкость, пластичность и эластичность при допустимой адгезии к поверхностям минеральных материалов. Модифицирование дорожных битумов комбинированной добавкой на основе шлама производства сульфонатной присадки и низкомолекулярного полиэтилена позволит расширить ассортимент полимеров-модификаторов полимер-битумных композиций, сократить вовлечение импортных добавок, снизить нагрузку на окружающую среду и получить положительный экономический эффект.*

**Ключевые слова:** *шлам от производства сульфонатной присадки, низкомолекулярный полиэтилен, битумные материалы.*

**Введение.** Нефтяные битумы остаются основным видом вяжущих материалов, применяемых в дорожном строительстве. Повышение технического уровня современных транспортных средств, рост дорожных сетей в районах с резкими колебаниями температур обуславливают необходимость увеличения объема производства дорожных битумов и улучшения их эксплуатационных характеристик [1–4]. Однако внедрение на нефтеперерабатывающих предприятиях процессов, направленных на углубление переработки нефти, приводит к резкому ухудшению группового состава нефтяных остатков, используемых в качестве сырья для процессов получения дорожных вяжущих<sup>1</sup>; <sup>2</sup>. Наиболее целесообразным, с технологической и экономической точек зрения, способом решения проблемы повышения эксплуатационных свойств битумных материалов для дорожного строительства является создание битумных композиционных и использование модифицирующих и интенсифицирующих добавок [1–4]. Применения технологий модифицирования и введения добавок на стадии получения товарной продукции позволяет обеспечить необходимые структурно-механические свойства битумов, полученных традиционным методом окисления гудрона или компаундирования остаточных и окисленных гудронов.

*Цель исследования* – разработать полимер-битумную композицию на основе дорожного битума и полимера-модификатора из нефтехимических отходов, отличающуюся использованием более дешевых и доступных компонентов по сравнению с промышленно производимыми аналогами и по уровню эксплуатационных показателей качества близкую к требованиям, предъявляемым к битумам модифицированным дорожным, обеспечивая их надежную эксплуатацию в составе битумных вяжущих.

**Методы исследования.** Изучено влияние вовлечения отходов производства сульфонатной присадки и низкомолекулярного полиэтилена на структурно-механические свойства битумных вяжущих. Выполнен подбор и изучены основные свойства исходных сырьевых компонентов: основы для модифицирования – дорожного битума марки БНД 50/70, произведенного по СТБ EN 12591 на ОАО «Нафтан»; предлагаемого полимера-модификатора – низкомолекулярного полиэтилена, произведенного по ТУ РБ 300041455.031 на заводе «Полимир» ОАО «Нафтан», и пластификатора – шлама от производства сульфонатной присадки, образующегося на ООО «ЭддиТек».

Шлам от производства сульфонатной присадки представляет собой мелкодисперсную систему с плотностью 920...1200 кг/м<sup>3</sup> от светло-коричневого до черного цвета, содержащую присадку (до 30% масс.), сульфат кальция (до 30% масс.), карбонат кальция (до 40% масс.), гидроксид кальция (до 3% масс.) и воду (остальное). Только на трех нефтеперерабатывающих заводах (Новокуйбышевском, Уфимском и Омском) шлам образуется в объемах более 50 тыс. т/год и является многотоннажным отходом. Для исследования использовали шлам производства сульфонатных присадок ООО «ЭддиТек» после отгонки воды и толуола – растворителя для обеспечения температуры вспышки продукта выше 250 °С. В полученном твердом остатке после отгонки воды и растворителя содержание сульфата кальция, карбоната кальция и гидроксида кальция может достигать более 50% масс. от остатка.

<sup>1</sup> Булавка Ю.А., Москаленко А.С. Изучение влияния комбинированной добавки из отходов полимерного производства на показатели качества нефтяного дорожного битума // Достижения молодых ученых: химические науки: тезисы III Всерос. молодеж. конф. / Уфа (16–19 мая 2018 г.) / отв. ред. Р.М. Ахметханов. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2018. – С. 448–453.

<sup>2</sup> Булавка, Ю.А. Полимер-модификатор для битумов из отходов производства // Материалы с заданными свойствами на переходе к новому технологическому укладу: химические технологии: сб. материалов II науч.-техн. конф. – М.: Курчат. ин-т – ИРЕА, 2020. – С. 60–61.

Низкомолекулярный полиэтилен (НМПЭ) представляет собой побочный продукт производства полиэтилена высокого давления, относится к классу полиолефинов; гидрофобное вещество от белого до серого цвета, обладающее высокой адгезией к различным материалам; устойчив к воздействию химически агрессивных сред, имеет высокую температуру вспышки (выше 250 °С)<sup>3</sup> [5–7]. НМПЭ состоит в основном из олефинов с прямой цепью из 10–20 атомов углерода, кроме скелетных СН<sub>2</sub>-групп, содержат ненасыщенные связи и концевые СН<sub>3</sub>-группы. Средняя молекулярная масса НМПЭ в интервале от 1000 до 4500. Объем образования низкомолекулярного полиэтилена изменяется в зависимости от типа процесса получения полиэтилена высокого давления, температурного режима в реакторе, применяемых инициаторов и в среднем составляет: 0,15 кг/т для однозонного процесса и 0,7 кг/т для двухзонного процесса для автоклавного реактора цеха № 102; 0,2 кг/т полиэтилена для трубчатого реактора цеха № 105 завода «Полимир» ОАО «Нафтан» [5].

Технические характеристики низкомолекулярного полиэтилена завода «Полимир» ОАО «Нафтан» представлены в таблице 1. Для получения комбинированной добавки использовали образцы НМПЭ цеха № 105 завода «Полимир» ОАО «Нафтан» с температурой каплепадения 75 °С.

Таблица 1. – Технические характеристики НМПЭ

| Наименование показателей        | НМПЭ цеха № 105                                           | НМПЭ цеха № 102 (однозонный процесс)                      | НМПЭ цеха № 102 (двухзонный процесс)                                                           |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Внешний вид                     | Мазе- или воскоподобный продукт без посторонних включений | Мазе- или воскоподобный продукт без посторонних включений | Мазе- или воскоподобный продукт без посторонних включений, а также структурированного полимера |
| Цвет                            | от белого до серовато-желтого                             | от белого до серовато-желтого                             | от белого до серовато-желтого                                                                  |
| Температура каплепадения, °С    | 30–90                                                     | 65–120                                                    | 25–65                                                                                          |
| Доля летучих %, масс., не более | 0,5                                                       | 0,5                                                       | 0,5                                                                                            |

На лабораторной установке предварительным смешением в массовых соотношениях 1:1 и 2:1 полимера-модификатора (НМПЭ) и пластификатора (шлам от производства сульфатной присадки), их термообработкой при температуре взаимного растворения 100...120 °С в течение 90...120 мин при постоянном перемешивании получили комбинированные добавки. Далее выполнили компаундирование до однородного состояния дорожного битума марки БНД 50/70 с предлагаемой комбинированной добавкой в концентрациях 1, 3 и 5% масс. при температуре не более 150...160 °С в течение 90...120 мин при постоянном перемешивании со скоростью вращения мешалки якорного типа 60 об/мин. После тестирования и анализа основных показателей качества битумных композиций были определены: температуры размягчения и хрупкости, глубина проникания иглы при 25 °С и растяжимость при 0 °С, адгезия по песчано-гравийной смеси, интервал пластичности и индекс пенетрации.

**Результаты и их обсуждение.** Результаты анализа эксплуатационных свойств модифицированных битумов в сравнении с товарным битумом и стандартами качества представлены в таблице 2.

Вовлечение комбинированной добавки приводит к повышению теплостойкости и морозоустойчивости битума и расширению допустимого температурного диапазона применения, что подтверждается линейным повышением температуры размягчения, снижением температуры хрупкости и увеличением интервала пластичности модифицированного битума, что, вероятно, связано с образования во всем объеме эластичной структурной сетки из макромолекул НМПЭ, между которыми распределены мицеллы сульфатов шлама, образующие длинные скрученные волокна. Повышение интервала пластичности модифицированных комбинированной добавкой битумов приведет к повышению деформационной способности, стойкости к образованию трещин при низких температурах и стойкости против сдвига при повышенных летних температурах.

Вовлечение в битум комбинированной добавки, состоящий из 1 части НМПЭ и 1 части шлама сульфатной присадки, приводит к линейному снижению глубины проникания иглы, и как следствие, повышению твердости модифицированного битума, что обусловлено ростом твердой фазы за счет повышения концентрации концентрата кальциевых соединений шлама. Вместе с тем вовлечение в битум комбинированной добавки, состоящей из 2 частей НМПЭ и 1 части шлама сульфатной присадки, приводит к линейному росту пенетрации и, как следствие, большей мягкости модифицированного битума, что, вероятно, обусловлено более равномерным распределением мицелл сульфатов шлама в более высокой концентрации макромолекул НМПЭ.

Вовлечение комбинированной добавки приводит к линейному снижению растяжимости при 0 °С модифицированного битума, однако измеренные значения не превышают нормативов, указанных в ГОСТ 33133. Стойкость к затвердеванию при 163 °С модифицированных комбинированной добавкой битумов также в пределах нормативных значений.

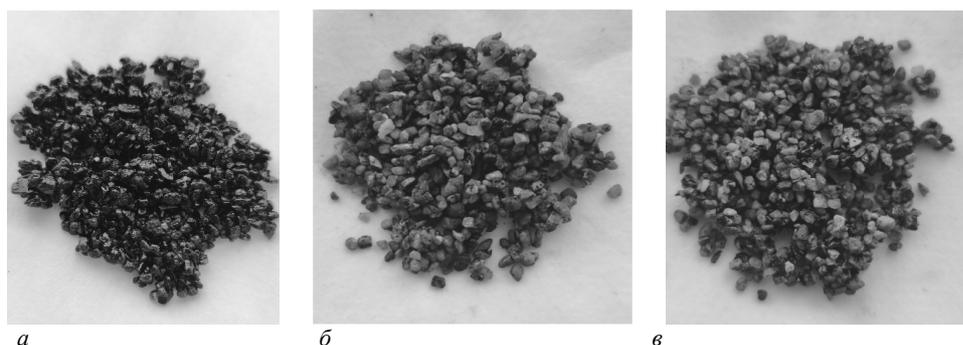
<sup>3</sup> Булавка, Ю.А. Вовлечение отходов нефтехимии в производство битумных материалов // Нефть и газ – 2020: сб. тез. докл. 74-й Междунар. молодеж. науч. конф. / Москва (28 сент. – 02 окт. 2020 г.). – Т. 2. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2020. – С. 144–145.

Таблица 2. – Результаты анализа эксплуатационных свойств модифицированных битумов

| Основные показатели                                                  | По ТНПА      | Фактическое значение для БНД 50/70 | Модифицированный битум БНД 50/70   |          |          |                                    |          |          |
|----------------------------------------------------------------------|--------------|------------------------------------|------------------------------------|----------|----------|------------------------------------|----------|----------|
|                                                                      |              |                                    | 1 ч. масс. НМПЭ : 1 ч. масс. шлама |          |          | 2 ч. масс. НМПЭ : 1 ч. масс. шлама |          |          |
|                                                                      |              |                                    | 1% масс.                           | 3% масс. | 5% масс. | 1% масс.                           | 3% масс. | 5% масс. |
| Глубина проникания иглы, 0,1 мм при 25 °С по ГОСТ EN 1426            | 50–70        | 49                                 | 45                                 | 44       | 43       | 54                                 | 56       | 59       |
| Температура размягчения по методу «Кольцо и шар», °С по ГОСТ EN 1426 | 46–54        | 47                                 | 47                                 | 48       | 50       | 48                                 | 50       | 52       |
| Растяжимость, см, при 0 °С по ГОСТ 11505                             | >3,5         | 7                                  | 6,1                                | 5,8      | 5,7      | 4,8                                | 4,5      | 4,3      |
| Температура хрупкости, °С по ГОСТ EN 12593                           | <-8          | -7                                 | -7                                 | -7       | -8       | -8                                 | -9       | -9       |
| Интервал пластичности                                                | -            | 54                                 | 54                                 | 55       | 58       | 56                                 | 59       | 61       |
| Индекс пенетрации по СТБ EN 12591                                    | -1,5 до +0,7 | 1,06                               | 1,19                               | 1,10     | 0,89     | 0,79                               | 0,49     | 0,17     |
| Стойкость к затвердеванию при 163 °С по ГОСТ EN 12607-1              |              |                                    |                                    |          |          |                                    |          |          |
| – изменение температуры размягчения, °С                              | <7           | 1,0                                | 1,0                                | 1,0      | 0,9      | 0,5                                | 1,0      | 1,35     |
| – изменение массы, %                                                 | <0,6         | 0                                  | 0                                  | 0        | 0        | 0,01                               | 0,02     | 0,01     |

Выполнен анализ изменения индекса пенетрации, характеризующего степень коллоидности битума и отклонение его состояния от чисто вязкостного. Требования по СТБ EN 12591 для вязких дорожных битумов предусматривают изменение индекса пенетрации от -1,5 до +0,7. В данный диапазон попадает комбинированная добавка, состоящая из 2 частей НМПЭ и 1 части шлама сульфонатной присадки. Дисперсная структура модифицированного битума наиболее приближена к типу золь-гель, оптимальному с точки зрения качества дорожного битума.

Изучено сцепление модифицированного битума с поверхностью минерального материала. Анализ выполняли на песчано-гравийной смеси фракции от 2 до 5 мм методом кипячения в течение 30 мин по ГОСТ 11508. Адгезия к минеральным материалам определяет важнейшее качество битумного вяжущего и является параметром, определяющим долговечность покрытий дорог. Изменение адгезии с поверхностью песчано-гравийной смеси для битума с различными концентрациями комбинированной добавки приведено на рисунке.



*a* – 0% масс.; *b* – 1% масс.; *v* – 5% масс.

**Рисунок. – Адгезия битума БНД 50/70 с поверхностью песчано-гравийной смеси с различными концентрациями комбинированной добавки, состоящей из 1 части НМПЭ и 1 части шлама сульфонатной присадки**

Визуальным путем установлено, что введение комбинированной добавки ухудшает адгезию с песчано-гравийной смесью, однако полного вымывания вяжущего не происходит и процент остаточного покрытия вяжущим песчано-гравийной смеси в пределах допустимых норм.

В целом, результаты проведенных исследований позволили установить, что для промышленной реализации возможно вовлечение до 3% масс. комбинированной добавки, состоящей из 2 частей НМПЭ и 1 части шлама сульфонатной присадки. Вовлечение более высокой концентрации добавки приведет к ухудшению такого показателя качества, как растворимость в толуоле или хлороформе (требуется не менее 99% масс.).

Совместное влияние компонентов предлагаемой комбинированной добавки на структуру битумного вяжущего позволяет повысить его теплостойкость и пластичность при допустимой адгезии к поверхностям минеральных материалов, что позволяет прогнозировать высокое качество дорожного покрытия. Таким образом, исследуемые отходы нефтехимии являются перспективными полимерными модификаторами при получении полимерно-битумных материалов.

**Заключение.** Совместное влияние компонентов предлагаемой комбинированной добавки на структуру битумного вяжущего позволяет повысить его теплостойкость, в т.ч. стойкость к колееобразованию при повышенных температурах, и пластичность при допустимой адгезии к поверхностям минеральных материалов, что позволяет прогнозировать достаточно высокое качество дорожного покрытия. Исследуемые отходы нефтехимии являются перспективными модификаторами при получении полимерно-битумных материалов. Рациональная утилизация исследуемых отходов нефтехимии с получением на их основе товарных продуктов не только позволит расширить их ассортимент, но и снизит нагрузку на окружающую среду.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Модификация дорожных битумов ОАО «Газпром нефтехим Салават» полимерными добавками, полученными на основе отходов полиэтилена высокого давления / Р.Н. Гайнанова, Е.О. Кольшева, В.А. Будник и др. // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2012. – № 8. – С. 19–24.
2. Исследования процесса получения покрытий различного назначения на основе модифицированного полимерными отходами нефтяного битума / К.С. Шыхалиев, И.К. Абдуллаева // International Scientific and Practical Conference World science. – 2017. – Т. 3, № 8(24). – С. 10–12.
3. Технология улучшения свойств дорожного битума модификацией вторичным полиэтиленом / К.К. Сырманова, Д.Б. Тлеуов, Е.Т. Боташев и др. // Научные труды ЮКГУ им. М. Ауэзова. – 2016. – № 2(37). – С. 20–24.
4. Проваторова Г.В. Экологические аспекты модификации битума // Умные композиты в строительстве. – 2021. – Т. 2. – № 1. – С. 47–52.
5. Булавка Ю.А., Петровская Ю.С., Ширабордина В.С. (2017). Современные альтернативные направления промышленного использования низкомолекулярного полиэтилена // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2017. – № 11. – С. 103–110.
6. Покровская С.В., Ощепкова Н.В., Булавка Ю.А. Пластичные смазки на основе низкомолекулярного полиэтилена завода «Полимир» ОАО «Нафтан» // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2009. – № 8. – С. 173–176.
7. Нефтяные композиции на основе низкомолекулярного полиэтилена / Ю.А. Булавка, С.В. Покровская, В.И. Сычевич и др. // Наука и инновации. – 2017. – Т. 6, № 172. – С. 31–33.

#### REFERENCES

1. Gainanova, R.N., Kolyshcheva, E.O., Budnik, V.A., Evdokimova, N.G. & Fatkullin, M.R. (2012). Modifikatsiya dorozhnykh bitumov ОАО «Gazprom neftekhim Salavat» polimernymi dobavkami, poluchennymi na os-nove otkhodov polietilena vysokogo davleniya [Modification of road bitumens of ОАО Gazprom neftekhim Salavat with polymer additives obtained on the basis of high-pressure polyethylene waste]. *Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tekhnicheskie dostizheniya i peredovoi opyt* [Oil refining and petrochemistry. Scientific and technical achievements and best practices], (8), 19–24. (In Russ., abstr. in Engl.)
2. Shykhaliyev, K.S. & Abdullaeva, I.K. (2017). Issledovaniya protsessa polucheniya pokrytii razlichnogo naznacheniya na osnove modifitsirovannogo polimernymi ot-khodami neftyanogo bituma [Research into the process of obtaining coatings for various purposes based on oil bitumen modified with polymer waste]. *International Scientific and Practical Conference World science*, T. 3, 8(24), 10–12. (In Russ., abstr. in Engl.)
3. Syrmanova, K.K., Tleuov, D.B., Botashev, E.T., Rivkina, T.V. & Kaldybekova, Zh.B. (2016). Tekhnologiya uluchsheniya svoistv dorozhnogo bituma modifikatsiei vtorichnym polietilenom [Technology for improving the properties of road bitumen by modification with secondary polyethylene]. *Nauchnye trudy YuKGU im. M. Auezova* [Scientific works of SKSU named after M. Auezov], 2(37), 20–24. (In Russ., abstr. in Engl.)
4. Provatorova, G.V. (2021). Ekologicheskie aspekty modifikatsii bituma [Ecological aspects of bitumen modification]. *Umnye kompozity v stroitel'stve* [Smart composites in construction], T. 2, (1), 47–52. (In Russ., abstr. in Engl.)
5. Bulavka, Yu.A., Petrovskaya, Yu.S. & Shirabordina, V.S. (2017). Sovremennye al'ternativnye napravleniya promyshlennogo ispol'zovaniya nizkomolekulyarnogo polietilena [Modern alternative directions of industrial use of low molecular weight polyethylene]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B, Promyshlennost'. Prikladnye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series B, Industrial. Applied Science], (11), 103–110. (In Russ., abstr. in Engl.)
6. Pokrovskaya, S.V., Oshchepkova, N.V. & Bulavka, Yu.A. Plastichnye smazki na osnove nizkomolekulyarnogo polietilena zavoda «Polimir» ОАО «Naftan» [Plastic lubricants based on low molecular weight polyethylene of the plant “Polimir” JSC “Naftan”]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B, Promyshlennost'. Prikladnye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series B, Industrial. Applied Science], (8), 173–176. (In Russ., abstr. in Engl.)
7. Bulavka, Yu.A., Pokrovskaya, S.V., Sytsevich, V.I., Shirabordina, V.S. & Petrovskaya, Yu.S. Neftyanye kompozitsii na osnove nizkomolekulyarnogo polietilena [Oil compositions based on low molecular weight polyethylene]. *Nauka i innovatsii* [Science and innovations], T. 6, (172), 31–33.

Поступила 22.06.2023

**MODIFICATION OF BITUMINOUS BINDERS WITH PETROCHEMISTRY WASTE**

**Y. BULAUKA, K. GRISHANIN, V. SLEPENKOV, E. STELMAKH**  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

*An analysis was made of the possibility of using sludge from the production of sulfonate additives and low molecular weight polyethylene for the modification of bituminous materials. It has been established that the combined effect of the components of the proposed combined additive on the structure of the bituminous binder makes it possible to increase its heat resistance, plasticity and elasticity, with acceptable adhesion to the surfaces of mineral materials. Modification of road bitumen with a combined additive based on sludge from the production of a sulfonate additive and low molecular weight polyethylene will expand the range of polymer modifiers for polymer-bitumen compositions, reduce the involvement of imported additives, reduce the burden on the environment and obtain a positive economic effect.*

**Keywords:** *sulfonate additive production sludge, low molecular weight polyethylene, bituminous materials.*

УДК 678.745.32: 693.542.4

DOI 10.52928/2070-1616-2023-48-2-80-85

**ПОЛУЧЕНИЕ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА СИНТЕТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН  
МОДИФИЦИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ**

*канд. хим. наук, доц. С.Ф. ЯКУБОВСКИЙ, канд. техн. наук, доц. Ю.А. БУЛАВКА,  
канд. техн. наук, доц. А.А. БАКАТОВИЧ, канд. техн. наук, доц. А.А. ЕРМАК,  
Д.Н. АЗАРЕНКО*

*(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

*Выполнен анализ возможности использования отходов технических при производстве синтетического волокна Нитрон-Д для получения модифицирующей добавки для строительных смесей. Проведенный комплексный анализ эффективности модифицирующей добавки для строительных смесей на основе отходов производства синтетического волокна Нитрон-Д позволяет прогнозировать усиление пластичности смеси и его коррозионной стойкости, снижение В/Ц, повышение удобоукладываемости строительных смесей и упрощение обрабатываемости их поверхности, улучшение связности и нерасслаиваемости смесей при малых расходах цемента, а также их высокую перекачиваемость бетононасосом. Кроме того, переработка отходов производства синтетического волокна позволит расширить ассортимент выпускаемой продукции, снизить количество отходов, подлежащих утилизации и рециклингу, что, в свою очередь, снизит отрицательную нагрузку на окружающую среду, и позволит перевести организации в разряд ресурсосберегающих, мало- и безотходных.*

**Ключевые слова:** *отходы производства синтетических волокон, полиакрилонитрил, гидролиз, добавки для строительных смесей.*

**Введение.** Рациональное использование отходов производства является ключевой экологической проблемой в современном мире, закрепленной 12-й целью устойчивого развития ООН, предусматривающей разработку моделей вторичного потребления отходов для перехода к циркулярной экономике. Особенно остра проблема поиска эффективных методов утилизации отходов на предприятиях нефтехимической отрасли, в т.ч. при производстве синтетических волокон. В частности, вторичным сырьем для получения модифицирующих добавок для строительных смесей могут служить различные полимерные отходы, такие как обрезки синтетического волокна из полиакрилонитрила (ПАН) при его производстве, что и определило цель настоящего исследования.

Модифицирующие добавки для бетонов, классификация которых приведена в ГОСТ 24211-91, являются универсальными средствами управления технологическими параметрами в производстве строительных материалов и регулирования их свойств. Использование отходов производства для синтеза модифицирующих добавок для бетонов позволит не только снизить себестоимость добавок, но и уменьшить негативную нагрузку на окружающую среду<sup>1; 2; 3; 4; 5</sup> [1–6].

Объектом исследования являются отходы технические при производстве синтетического волокна Нитрон-Д на заводе «Полимир» ОАО «Нафтан», состоящие из кусочков разной длины, которые отбираются на стадии промывки после прядения, до операции сушки, и имеют регламентируемую влажность до 60% масс., выпускаются по ТУ ВУ 300042199.041 (тип М) в объеме около 70 т/год. Поиск рациональных способов использования данных отходов с получением на их основе продуктов с высокой добавленной стоимостью является актуальным направлением научных исследований.

**Методы исследований.** Синтез модифицирующей добавки для строительных смесей осуществляли в лабораторных условиях в две стадии: на первой стадии проводили гидролиз отходов технических ПАН-волокон толщиной около 30 мкм в растворе 8% масс. гидроксида натрия при температуре, близкой к температуре кипения реакци-

<sup>1</sup> Суперпластификаторы для бетонной смеси на основе тяжелой смолы пиролиза / С.Ф. Якубовский, Ю.А. Булавка, Е.А. Шульга и др. // НЕФТЕХИМИЯ-2020: материалы III Междунар. науч.-техн. форума по хим. технологиям и нефтегазопереработке / Минск (2–3 дек. 2020 г.) – Минск: БГТУ, 2020. – С. 14–17.

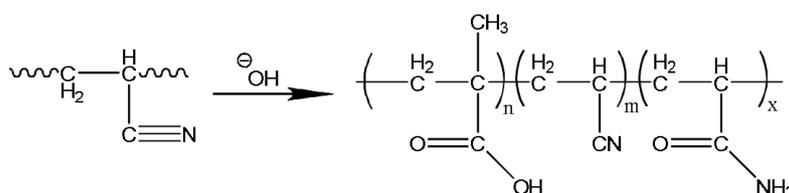
<sup>2</sup> Использование побочных продуктов пиролизных установок нефтехимических производств в строительстве / Ю.А. Булавка, Е.А. Шульга, Н.С. Вашкова и др. // Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2 т. Т. 1 / Тюмень (17–19 мая 2021 г.). – Тюмень, 2021. – С. 156–158.

<sup>3</sup> Вовлечение побочных продуктов пиролизных установок нефтехимических предприятий в производстве строительных материалов / Ю.А. Булавка, Н.С. Вашкова, Е.А. Шульга и др. // Западно-Сибирский нефтегазовый конгресс: сб. науч. тр. XIV Междунар. науч.-техн. конгресса студ. отд. о-ва инженеров-нефтяников – Society of Petroleum Engineers (SPE) / Тюмень (30 марта – 1 апр. 2022 г.). – Тюмень, 2022. – С. 106–107.

<sup>4</sup> Булавка Ю.А., Якубовский С.Ф., Вашкова Н.С. Использование побочных продуктов пиролизных установок нефтехимических предприятий в производстве строительных материалов // Нефтяная столица: материалы 4-й Междунар. молодеж. науч.-практ. форума / Ханты-Мансийск (24–25 марта 2021 г.). – Ханты-Мансийск, 2021. – С. 31–33.

<sup>5</sup> Изучение синтеза комплексной добавки для бетона на основе гидролизованного полиакрилонитрила / Э.С. Соттикулов, С.И. Назаров, Ж.У. Усмонов и др. // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2023. – № 2(107). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/15070> (дата обращения: 21.06.2023)

онной смеси (100–110 °С), в течение 4 ч при постоянном перемешивании и отводе выделяющегося аммиака. Основная реакция, протекающая при гидролизе отходов технических ПАН-волокна, – омыление нитрильных групп ( $-C \equiv N$ ) сополимера до карбоксилатных ( $-COONa$ ) через образование промежуточных соединений: полиенов, полиимидов, полиамидов. В ходе проведения гидролиза замечено: полимер в реакторе в течение первых 10 мин меняет свой цвет от белого до темно-красного, такая окраска сохраняется в течение 1 ч, при этом интенсивно выделяется аммиак. По истечении 1 ч смесь начинает светлеть и к концу процесса гидролиза становится оранжево-желтой. Темно-красная окраска свидетельствует о том, что нитрильные группы частично полимеризуются в азаполиены ( $C=N$ )<sub>n</sub>, которые гидролизуются до карбоксилатов. Продукт гидролиза – гидролизованный полиакрилонитрил, представляет собой сополимер, содержащий фрагменты акрилонитрила, акриловой кислоты и акриламида вида



На второй стадии получения модифицирующей добавки для строительных смесей выполнили синтез гидролизованного полиакрилонитрила с сульфитом натрия и формалином (в котором концентрация формальдегида 37% масс.) в массовом соотношении 2:1:2 при температуре 90 °С в течение 40 мин при постоянном перемешивании. Полученная модифицирующая добавка для строительных смесей содержит ряд функциональных групп:  $-SO_3H$ ,  $-NH_2$ ,  $-COOH$  и др. Молекулярное строение образцов изучали при помощи ИК-спектрометра Фурье Кауран.

Выполнили анализ основных показателей качества смесей строительных на цементном вяжущем (использовали портландцемент типа ЦЕМ I с классом прочности 42,5Н) по ГОСТ Р 58227-2018 и ГОСТ 5802-86: подвижность по распылу конуса и подвижность по распылу кольца, капиллярное водопоглощение и предел прочности на сжатие кубиков цементного камня размером 20x20x20 мм из цементного теста с В/Ц, равным 0,5, через 7 и 28 сут испытаний.

**Результаты и их обсуждение.** На рисунке 1, а, б приведены ИК-спектры исходного полиакрилонитрила и гидролизованного полиакрилонитрила соответственно.

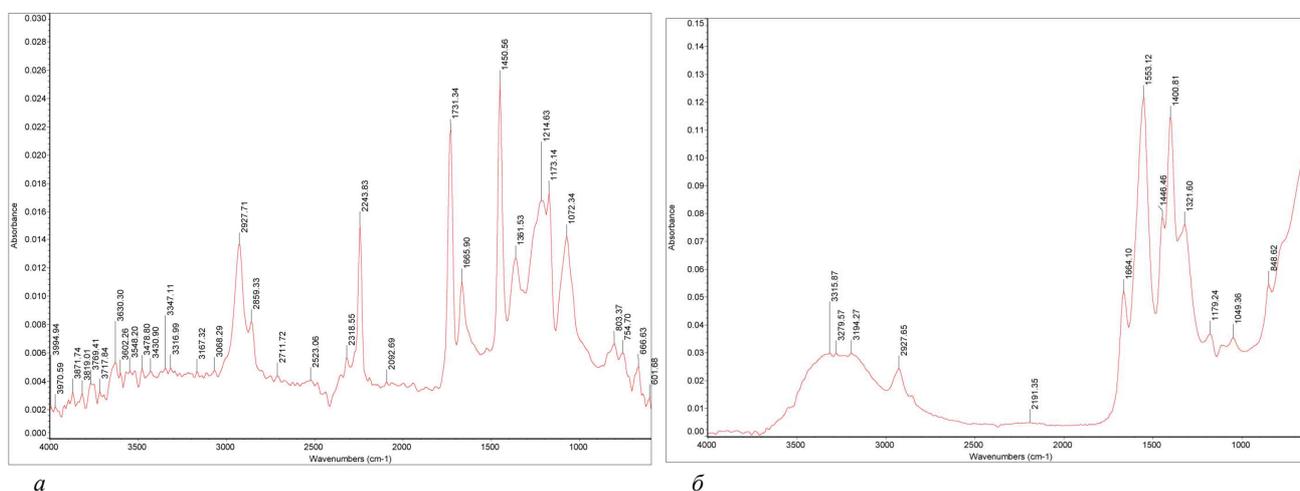


Рисунок 1. – ИК-спектры исходного полиакрилонитрила (а) и гидролизованного полиакрилонитрила (б)

По результатам ИК-спектральных исследований получены дополнительные сведения о механизме и кинетических закономерностях протекания щелочного гидролиза отходов технического волокна Нитрон-Д производства завода «Полимир» ОАО «Нафтан» и молекулярном строении продуктов гидролиза. Анализ ИК-спектров показал, что в ходе гидролиза происходит химическое превращение нитрильных групп ( $-C \equiv N$ ) исходного акрилонитрильного сополимера, на что указывает постепенное вырождение дублетной полосы при 2243  $cm^{-1}$ , отвечающей валентным колебаниям этой группы. С другой стороны, появляются полосы поглощения при частотах 1664 и 1553  $cm^{-1}$ , очевидно, относящиеся к валентным колебаниям связи  $C=O$ , соответственно, в амидной ( $-CONH_2$ ) (полоса амид I) и карбоксилатной ( $-COONa$ ) группах. При этом с увеличением продолжительности гидролиза наблюдается возрастание интенсивности этих полос относительно интенсивности полосы при 2927  $cm^{-1}$ , обусловленной валентными колебаниями групп  $-CH_2-$  макромолекулярной цепи.

На рисунке 2 представлен ИК-спектр модифицирующей добавки для строительных смесей на основе гидролизованного полиакрилонитрила, сульфита натрия и формалина.

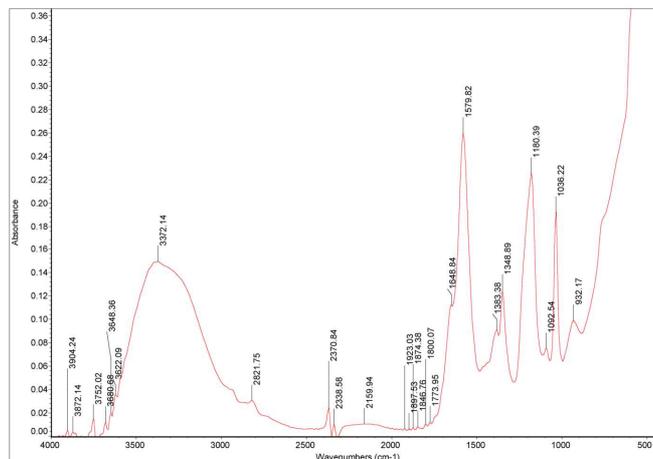


Рисунок 2. – ИК-спектр модифицирующей добавки для строительных смесей

На ИК-спектре четко прослеживается появление полосы поглощения при частоте  $1180\text{ см}^{-1}$ , очевидно, относящиеся к новой функциональной группе  $-\text{O}-\text{CH}_2\text{SO}_3\text{H}$ .

Результаты анализа подвижности цементного теста по распылу конуса и по распылу кольца по ГОСТ Р 58227-2018 приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. – Подвижность цементного теста по распылу кольца

| Расход добавки, % масс. | Диаметр распыла, мм |         |         |
|-------------------------|---------------------|---------|---------|
|                         | Опыт 1              | Опыт 2  | Опыт 3  |
| 0                       | 116x122             | 118x120 | 117x120 |
| 0,5                     | 151x148             | 151x148 | 150x146 |
| 1,0                     | 200x205             | 201x205 | 199x203 |

Таблица 2. – Подвижность цементного теста по распылу конуса

| Расход добавки, % масс. | Диаметр распыла, мм |         |         |
|-------------------------|---------------------|---------|---------|
|                         | Опыт 1              | Опыт 2  | Опыт 3  |
| 0                       | 79x80               | 78x81   | 80x80   |
| 0,5                     | 106x106             | 106x100 | 104x102 |
| 0,7                     | 120x125             | 120x122 | 120x125 |
| 0,9                     | 150x160             | 155x161 | 153x164 |
| 1,0                     | 155x166             | 157x167 | 156x166 |

По увеличению подвижности цементного теста по распылу конуса и кольца установлено пластифицирующее действие синтезированной добавки, которая повышает текучесть строительных растворов без дополнительного добавления воды. Механизм пластифицирующего действия предлагаемой добавки заключается в изменении свойств поверхности частиц твердой фазы (цемента) за счет изменения соотношения между пленочной и свободной водой. Насыщенный функциональными группами пластификатор в результате пептизирующего действия увеличивает количества пленочной воды, стабилизируя систему в целом. Рекомендуемая дозировка добавки – 0,5% масс. Увеличение расхода свыше 0,9% масс. нецелесообразно. Анализ водоотделения цементного теста капиллярным водопоглощением по ГОСТ Р 58227-2018 показал высокую водоудерживающую способность. Добавка не содержит хлоридов и других веществ, вызывающих коррозию арматуры, что допускает ее применение при изготовлении стальных и предварительно напряженных железобетонных конструкций.

Результаты анализа предела прочности на сжатие кубиков размером  $20\times 20\times 20$  мм цементного камня с В/Ц равным 0,5 через 7 и 28 сут по ГОСТ Р 58227-2018 приведены в таблице 3.

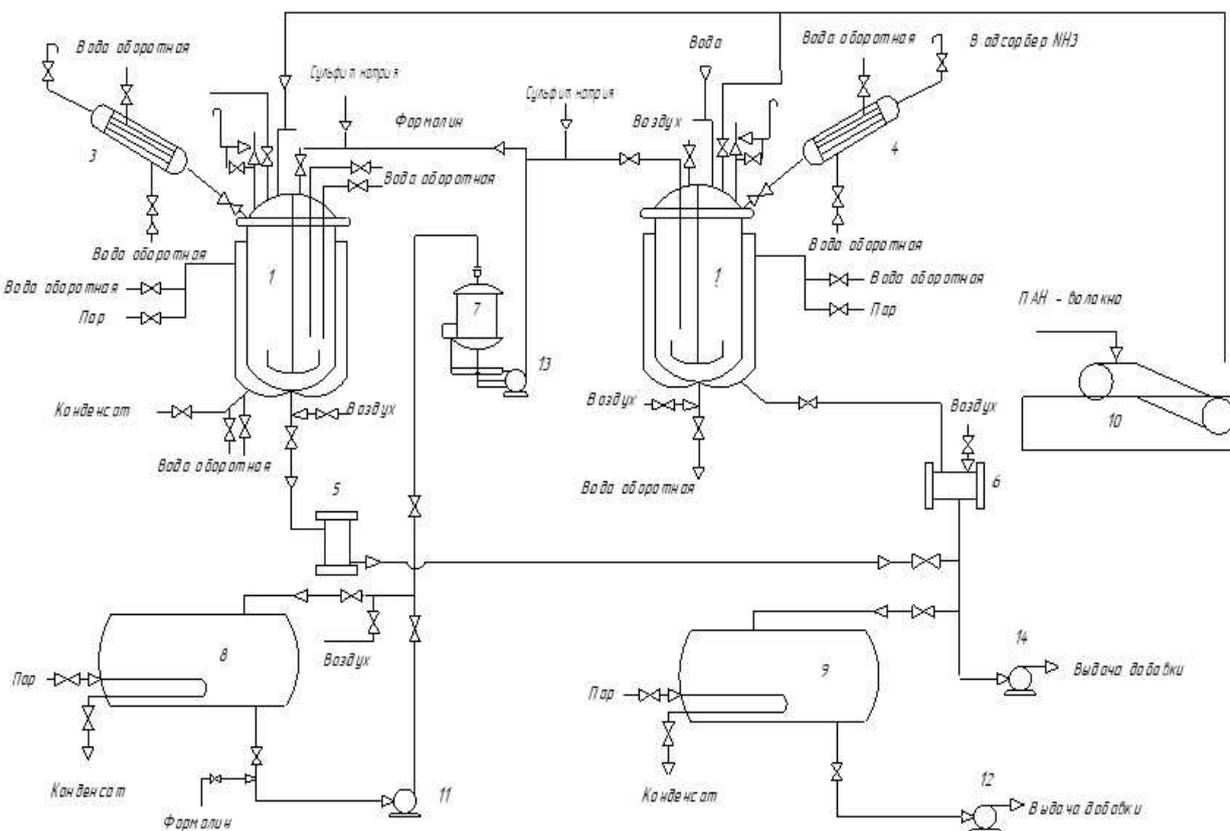
Таблица 3. – Предел прочности на сжатие кубиков цементного камня в зависимости от срока хранения

| Расход добавки, % масс. | Предел прочности на сжатие, МПа, в возрасте |        |
|-------------------------|---------------------------------------------|--------|
|                         | 7 сут                                       | 28 сут |
| 0                       | 60,575                                      | 71,702 |
| 0,5                     | 64,545                                      | 67,319 |
| 1,0                     | 58,615                                      | 59,794 |

Результаты испытаний образцов цементного камня на прочность (сжатие), изготовленных из цементного теста нормальной плотности, показали, что вовлечение предлагаемой добавки существенно не изменяет данный показатель, что подтверждает ее эффективность в цементном камне и, следует ожидать, аналогичного эффекта в бетоне.

В настоящее время на базе ОАО «Завод горного воска» налажено производство реагента для ограничения водопоглощения ОВП-1 по ТУ ВУ 600125053.034-2006 на основе гидролизованного полиакрилонитрила, стоимость продукта 380 долл./т [7–10]. Используя технологическую линию, приведенную на рисунке 3, которая работает в течение нескольких месяцев в год периодически в зависимости от потребности, для получения модифицирующей добавки для строительных смесей на основе гидролизованного полиакрилонитрила, сульфата натрия и формалина, возможно получение продукта с более высокой добавленной стоимостью – более 1 тыс. долл./т. Основные этапы изготовления модифицирующей добавки для строительных смесей на основе гидролизованного полиакрилонитрила, сульфата натрия и формалина на базе ОАО «Завод горного воска» следующие: резка отходов волокна на волокноизмельчительной машине ВИРМ 1,8; загрузка в реактор сырья и реагентов (вода, щелочь, резаное волокно); нагрев реакционной смеси; гидролиз; загрузка в реактор формалина и сульфата натрия; охлаждение реакционной смеси; отбор проб из реакторов для анализа на соответствие готового продукта требованиям технических условий; выдача модифицирующей добавки из реакторов через систему фильтров в накопительную передвижную емкость или автоцистерну; отбор проб из накопительной, передвижной емкости или автоцистерны для анализа на соответствие готового продукта требованиям технических условий; отгрузка продукта потребителю.

В. А. Сорбер ННЗ



- 1, 2 – реакторы с мешалками; 3, 4 – теплообменники; 5, 6 – фильтры; 7 – мерник для формалина;  
8 – накопительная емкость для формалина; 9 – накопительная емкость для добавки;  
10 – волокноизмельчительная машина ВИРМ 1,8; 11–14 – насосы

Рисунок 3. – Технологическая схема получения модифицирующей добавки для строительных смесей на основе гидролизованного полиакрилонитрила, сульфата натрия и формалина на базе ОАО «Завод горного воска»

**Заключение.** Выполненный комплексный анализ эффективности модифицирующей добавки для строительных смесей на основе гидролизованного полиакрилонитрила, сульфата натрия и формалина позволяет прогнозировать усиление пластичности смеси и его коррозионной стойкости, снижение В/Ц, повышение удобо-

укладываемости строительных смесей и упрощение обрабатываемости их поверхности; улучшение связности и нерасслаиваемости строительных смеси при малых расходах цемента, а также их высокую перекачиваемость бетононасосом. Переработка отходов производства синтетического волокна позволит расширить ассортимент выпускаемой продукции, снизить количество отходов, подлежащих утилизации и рециклингу, что, в свою очередь, снизит отрицательную нагрузку на окружающую среду, и позволит перевести организации в разряд ресурсосберегающих, мало- и безотходных.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шведов А.П., Якубовский С.Ф., Шведов А.А. Состав углеводородного сырья и особенности технологического процесса получения пластифицирующих добавок в бетонные смеси // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Приклад. науки. – 2014. – № 8. – С. 72–79.
2. Шведов А.П., Якубовский С.Ф. Производство химических добавок в бетоны на основе сульфирования продуктов неорганических производств // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2011. – № 11. – С. 143–148.
3. Шведов А.П., Якубовский С.Ф. Технологии синтеза суперпластификаторов на основе нафталиновых соединений // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Приклад. науки. – 2008. – № 8. – С. 75–78.
4. Шведов А.П., Якубовский С.Ф., Зубова А.В. Расширение сырьевой базы для производства суперпластификаторов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Приклад. науки. – 2007. – № 12. – С. 68–72.
5. Шведов А.П., Якубовский С.Ф. Развитие технологии получения пластификатора бетонных смесей на основе тяжелых жидких продуктов пиролиза // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2006. – № 3. – С. 45–49.
6. Якубовский С.Ф., Шведов А.П. Возможности расширения сырьевой базы для производства суперпластификаторов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2006. – № 3. – С. 50–52.
7. Сенчук Н.В. Ограничение водоприток в скважины с использованием реагента ОВП-1 // Тр. БГТУ. Сер. IV, Химия, технология орган. веществ и биотехнология. – 2010. – С. 66–70.
8. Сенчук Н.В., Макаревич А.В. Полимерный реагент на основе гидролизованного полиакрилонитрила для ограничения водоприток в нефтяные скважины // Тр. БГТУ. – 2011. – № 4(142). – С. 107–113.
9. Реагент «ОВП-1» – Применение в технологиях ограничения водопритока и повышения нефтеотдачи пластов / А.В. Макаревич, В.Г. Пысенков, П.В. Лымарь, Пирожков В.В. и др. // Нефтепромысловое дело. – 2008. – № 2. – С. 26–29.
10. Сенчук Н.В., Макаревич А.В., Пушнова Г.М. Технологические отходы полиакрилонитрильного волокна – ценный сырьевой ресурс при производстве реагентов для ограничения водопритока в нефтяные скважины // Экология пром. пр-ва. – 2011. – № 2. – С. 45–48.

## REFERENCES

1. Shvedov, A.P., Yakubovskii, S.F. & Shvedov, A.A. (2014). Sostav uglevodorodnogo syr'ya i osobennosti tekhnologicheskogo protsessa polucheniya plastifitsiruyushchikh dobavok v betonnye smesi [Composition of hydrocarbon raw materials and features of the technological process of obtaining plasticizing additives in concrete mixtures]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universite-ta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series F. Construction. Applied Sciences], (8), 72–79. (In Russ., abstr. in Engl.)
2. Shvedov, A.P. & Yakubovskii, S.F. (2011). Proizvodstvo khimicheskikh dobavok v betony na osnove sulfirovaniya produktov neorganicheskikh proizvodstv [Production of chemical additives in concrete based on sulfonation of inorganic products]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B, Promyshlennost'. Prikladnye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series B, Industry. Applied sciences], (11), 143–148. (In Russ., abstr. in Engl.)
3. Shvedov, A.P. & Yakubovskii, S.F. (2008). Tekhnologii sinteza superplastifikatorov na osnove naftalinovykh soedinenii [Technologies for the synthesis of superplasticizers based on naphthalene compounds]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universite-ta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series F. Construction. Applied Sciences], (8), 75–78. (In Russ., abstr. in Engl.)
4. Shvedov, A.P., Yakubovskii, S.F. & Zubova A.V. (2007). Rasshirenie syr'evoi bazy dlya proizvodstva superplastifikatorov [Expansion of the raw material base for the production of superplasticizers]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universite-ta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series F. Construction. Applied Sciences], (12), 68–72. (In Russ., abstr. in Engl.)
5. Shvedov, A.P. & Yakubovskii, S.F. (2006). Razvitie tekhnologii polucheniya plastifikatora betonnykh smesei na osnove tyazhelykh zhidkikh produktov piroliza [Development of technology for obtaining a plasticizer for concrete mixtures based on heavy liquid pyrolysis products]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B, Promyshlennost'. Prikladnye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series B, Industry. Applied sciences], (3), 45–49. (In Russ., abstr. in Engl.)
6. Yakubovskii, S.F. & Shvedov, A.P. (2006). Vozmozhnosti rasshireniya syr'evoi bazy dlya proizvodstva superplastifikatorov [Possibilities of expanding the raw material base for the production of superplasticizers]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B, Promyshlennost'. Prikladnye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series B, Industry. Applied sciences], (3), 50–52. (In Russ., abstr. in Engl.)
7. Senchuk, N.V. (2010). Ogranichenie vodopritokov v skvazhiny s ispol'zovaniem reagenta OVP-1 [Restriction of water inflows into wells using the reagent ORP-1]. *Trudy BGTU. Seriya IV. Khimiya, tekhnologiya organicheskikh veshchestv i biotekhnologiya* [Proceedings of BSTU. Series IV. Chemistry, technology of organic substances and biotechnology], 66–70. (In Russ., abstr. in Engl.)

8. Senchuk, N.V. & Makarevich, A.V. (2011). Polimernyi reagent na osnove gidrolizovannogo poliakrilonitrila dlya ogranicheniya vodopritokov v neftyanye skvazhiny [Polymer reagent based on hydrolyzed polyacrylonitrile for limiting water inflow into oil wells]. *Trudy BGTU [Proceedings of BSTU]*, 4(142), 107–113. (In Russ., abstr. in Engl.)
9. Makarevich, A.V., Pysenkov, V.G., Lyman', P.V., Pirozhkov, V.V., Parkalova, E.I., Mel'gui, A.V., ... Senchuk, N.V. (2008). Reagent «OVP-1» – Primenenie v tekhnologiyakh ogranicheniya vodopritoka i povysheniya nefteotdachi plastov [Reagent “OVP-1” – Application in technologies for limiting water inflow and increasing oil recovery]. *Neftepromyslovoe delo [Oilfield business]*, (2), 26–29. (In Russ., abstr. in Engl.)
10. Senchuk, N.V., Makarevich, A.V. & Pushnova G.M. (2011). Tekhnologicheskie otkhody poliakrilonitril'nogo volokna – tsennyi s-r'evoi resurs pri proizvodstve reagentov dlya ogranicheniya vodopritoka v neftyanye skvazhiny [Technological waste of polyacrylonitrile fiber – a valuable raw material resource in the production of reagents to limit water inflow into oil wells]. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva [Ecology of industrial production]*, (2), 45–48. (In Russ., abstr. in Engl.)

Поступила 22.06.2023

#### OBTAINING A MODIFYING ADDITIVE FOR BUILDING MIXTURES BASED ON SYNTHETIC FIBER PRODUCTION WASTE

S. YAKUBOUSKI, Y. BULAUKA, A. BAKATOVICH, A. ERMAK, D. AZARENKO  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

*An analysis was made of the possibility of using technical waste in the production of synthetic fiber Nitron-D to obtain a modifying additive for building mixtures. An analysis was made of the possibility of using technical waste in the production of synthetic fiber Nitron-D to obtain a modifying additive for building mixtures. A comprehensive analysis of the effectiveness of a modifying additive for building mixtures based on waste from the production of synthetic fibers makes it possible to predict an increase in the plasticity of the mixture and its corrosion resistance, a decrease in W / C, an increase in the workability of building mixtures and a simplification of their surface machinability; increasing the cohesiveness and non-separability of building mixtures at low cement consumption, as well as their high pumpability with concrete pumps. Recycling of waste from the production of synthetic fiber will expand the range of products, reduce the amount of waste to be disposed of and recycled, which, in turn, will reduce the negative burden on the environment and will allow organizations to become resource-saving, low-waste and waste-free.*

**Keywords:** Oil pollution, sorbent, sorption, forestry and agricultural waste.

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ МАГИСТРАЛЬНЫМ ТРУБОПРОВОДНЫМ ТРАНСПОРТОМ

канд. экон. наук, доц. С.В. БОСЛОВЯК, канд. техн. наук, доц. А.Г. КУЛЬБЕЙ,  
А.И. ЯКУБЕНКО, А.Н. ЯНУШОНОК  
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

*При проведении технологических операций по транспортировке нефти и нефтепродуктов происходят потери перекачиваемого углеводородного сырья. Исторически сложилось, что учет данных потерь осуществлялся в соответствии с нормами естественной убыли, которые определены эмпирическим путем и не имеют четкого научного обоснования. В статье представлен методологический подход к определению уровня технологических потерь нефти и нефтепродуктов при осуществлении технологических операций при транспортировке магистральным трубопроводным транспортом. Все технологические потери разделены на две группы: потери при техническом обслуживании и ремонте оборудования трубопроводов; потери вследствие испарения из емкостного оборудования. Для каждой из групп предложена обоснованная методика расчета технологических потерь с учетом особенностей эксплуатации оборудования и сезонного фактора. Разработанная методика может быть использована предприятиями по транспорту нефти и нефтепродуктов для объективной и полной оценки технологических потерь, их последующего учета в договорах с контрагентами, выбора оптимальных схем движения углеводородов по линейным и площадочным объектам предприятий.*

**Ключевые слова:** технологические потери, нефть, нефтепродукты, техническое обслуживание, трубопровод, резервуар.

**Введение.** Современные технологии транспорта и хранения нефти и нефтепродуктов не позволяют полностью исключить их потери в ходе осуществления необходимых технологических операций. В процессе доставки нефти и нефтепродуктов до места потребления имеют место операции заполнения и опорожнения резервуаров и дренажных емкостей товарных парков нефтеперекачивающих станций, нефтебаз и нефтеперерабатывающих заводов, а также неподвижного хранения нефти нефтепродуктов, вследствие чего допускаются потери их от испарения. Кроме того, любой вид регламентных и ремонтных работ на магистральном трубопроводе сопровождается неизбежными потерями транспортируемого продукта.

Исторически сложилось, что снижение количества нефти и нефтепродуктов при их транспортировке учитывалось на основании норм естественной убыли нефти и нефтепродуктов. При этом нормы предусматривали разделение убыли на две составляющие: убыль на линейной части (далее – ЛЧ) магистральных трубопроводов и убыль на площадках в резервуарных парках. Убыль углеводородов в этих составляющих была сопоставима друг с другом и в отдельных случаях не имела рационального обоснования. Так, например, для практически герметичной линейной части магистрального трубопровода, где уменьшение количества нефти и нефтепродуктов в существенных размерах возможно только при разгерметизации трубопровода (аварийные утечки), нормы естественной убыли зависят исключительно от его протяженности и при реализации схем перекачки «из насоса в насос» на протяженных участках могут существенно превышать убыль от испарения в резервуарных парках линейных производственно-диспетчерских станций (далее – ЛПДС). В настоящее время от термина «естественная убыль» переходят к термину «технологические потери», которые требуют соответствующего обоснования. Под технологическими потерями нефти или нефтепродуктов при транспортировке магистральным трубопроводным транспортом понимаются безвозвратные потери (уменьшение массы) нефти или нефтепродуктов, обусловленные технологическими особенностями процесса транспортировки (приема, перемещения, откачки), а также физико-химическими характеристиками транспортируемой нефти, нефтепродуктов<sup>1</sup>.

Анализ существующей нормативной и научной литературы позволил выявить следующие проблемные моменты:

---

<sup>1</sup> Методические рекомендации по определению технологических потерь нефти и нефтепродуктов при транспортировке магистральным трубопроводным транспортом [Электронный ресурс] / утв. М-ом энергетики Рос. Федерации 20.08.2012. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293788/4293788488.pdf>.

– более полное отражение в научной литературе получили технологические потери, возникающие при добыче нефти на месторождениях<sup>2</sup> [1; 2], в то время как технологические потери нефти и нефтепродуктов при их транспортировке и хранении не получили полного и системного рассмотрения;

– отсутствие единообразия в технических нормативных правовых актах при определении источников и видов технологических потерь при транспортировке нефти и нефтепродуктов магистральными трубопроводами;

– исследователи сходятся в необходимости учитывать технологические потери, возникающие при «больших» и «малых» дыханиях резервуаров, однако до сих пор отсутствует единый методический подход, позволяющий объективно оценивать уровень таких потерь;

– при эксплуатации объектов линейной части магистральных нефте- и продуктопроводов технологические потери рассматриваются, как правило, укрупненно (сальниковые и торцовые уплотнения), без детализации по конкретным видам технологического оборудования.

Нерешенные проблемы обусловили цель исследования – на основе детального выявления источников и видов технологических потерь при транспортировке нефти и нефтепродуктов магистральными трубопроводами разработать методический подход к оценке их уровня дифференцированно по объектам резервуарных парков и линейной части;

Для достижения поставленной цели исследования нами решены следующие задачи:

– определен состав технологических потерь при транспортировке нефти и нефтепродуктов с учетом особенностей современного оборудования и уровня технологий магистрального трубопроводного транспорта;

– составлен список источников и видов технологических потерь при проведении работ по техническому обслуживанию и ремонту линейной части магистральных нефтепроводов;

– разработана универсальная методика расчета уровня технологических потерь нефти и нефтепродуктов при проведении операций их приема, откачки и хранения в резервуарных парках нефтеперекачивающих станций с учетом конструктивных особенностей резервуаров, периодичности операций и физико-химических свойств перекачиваемого продукта;

– разработана методика расчета уровня технологических потерь при проведении работ по техническому обслуживанию и ремонту линейной части магистральных нефтепроводов по каждому их источнику с учетом заданного количества источников потерь, объемов и периодичности таких работ.

**Основная часть.** Решение поставленных задач основывалось на последовательном переборе всех технологических операций, производимых при транспортировке и хранении нефти и нефтепродуктов. Из всего перечня операций отбирались для дальнейшего исследования только те, при которых возможны потери углеводородов вследствие их прямого контакта с окружающей средой, включая те, где контакт происходит и через уплотнения и прочие системы снижения потерь нефти (нефтепродуктов). В результате анализа полученных данных проведена классификация потерь нефти и нефтепродуктов. Все потери были разделены на две основные группы:

- технологические потери при техническом обслуживании и ремонте (далее – ТОР) оборудования;
- технологические потери вследствие испарения из емкостного оборудования.

Также технологические потери были разделены на зависящие от объема перекачки (например, потери от «дыханий» резервуаров) и независящие (например, потери при обслуживании запорной арматуры по временному графику).

Для удобства работы потери учитывались отдельно для площадочных объектов (НПС и ЛПДС) и для линейной части. Впоследствии данное разделение позволило упростить расчет величины потерь по различным маршрутам транспортировки путем сложения их по каждому выделенному элементу (площадке НПС, ЛПДС, линейному участку между ними).

При составлении методики потери нефти, происходящие во время аварий и инцидентов, не учитывались, т.к. в таком случае компенсация ущерба осуществляется виновной стороной. Также не учитывались потери, связанные с несовершенством оборудования и методик измерения ее количества, т.к. данные вопросы относятся к метрологическому обеспечению транспортировки.

*Определение технологических потерь при техническом обслуживании и ремонте оборудования линейной части магистральных трубопроводов.* Перечень оборудования, эксплуатируемого на магистральном транспорте нефти (нефтепродуктов), для уменьшения объемов расчетов был разбит на ряд категорий по их назначению и типоразмеру. В дальнейшем для каждой из категорий определялась величина потерь.

<sup>2</sup> Чурикова Л.А., Джексонов Т.Б. Анализ методов и перспективы борьбы с потерями нефти на месторождении // Технические науки в России и за рубежом: материалы VI Междунар. науч. конф. / Москва (ноябрь 2016 г.). – М.: Буки-Веди, 2016. – С. 59–63.

Для запорной и регулирующей арматуры величину технологических потерь ( $Y_{за}$ ) предлагаем определять в зависимости от ее количества и вида (задвижки, вентили, краны, находящиеся под давлением) при перекачке по конкретному маршруту транспортировки, а также периодичности их ТОР. Однако в процессе исследования мы пришли к выводу, что утечки зависят не столько от вида запорной арматуры (задвижка или вентиль), сколько от ее размеров. Поэтому в соответствии со сложившейся практикой отечественных предприятий по транспорту нефти и нефтепродуктов запорная арматура разделена на две группы: DN50-250 и DN300-1020, с периодичностью ТОР для первой группы 1 раз в 3 месяца (4 раза в год) и 1 раз в месяц (12 раз в год) для второй. Поэтому расчет целесообразно проводить для каждой группы запорной арматуры отдельно, а затем суммировать результаты для каждого маршрута транспортировки.

Величина технологических потерь при ТОР запорной арматуры ( $Y_{за}$ ) может определяться по формуле

$$Y_{за} = n_1 \cdot P_{ТОР\ 3A1} \cdot P_{3A1} + n_1 \cdot P_{3A1} + n_2 \cdot P_{ТОР\ 3A2} \cdot P_{3A2} + n_2 \cdot P_{3A2}, \text{ м}^3, \quad (1)$$

где  $n_1$  – количество запорной арматуры первой группы на конкретном маршруте транспортировки, шт;  
 $P_{ТОР\ 3A1}$  – объем технологических потерь при ТОР запорной арматуры первой группы, м<sup>3</sup>;  
 $P_{3A1}$  – среднегодовое количество ТОР запорной арматуры первой группы, раз в год;  
 $P_{3A1}$  – объем среднегодовых технологических потерь через сальник запорной арматуры первой группы, м<sup>3</sup>;  
 $n_2$  – количество запорной арматуры второй группы, (DN300-1020) на конкретном маршруте транспортировки, шт;  
 $P_{ТОР\ 3A2}$  – объем технологических потерь при ТОР запорной арматуры второй группы, м<sup>3</sup>;  
 $P_{3A2}$  – среднегодовое количество ТОР запорной арматуры второй группы, раз в год;  
 $P_{3A2}$  – объем среднегодовых технологических потерь через сальник запорной арматуры второй группы, м<sup>3</sup>.

В данной формуле учтено, что технологические потери происходят как при ТОР запорной арматуры ( $P_{ТОР\ 3A}$ ), так и постоянно при просачивании через уплотняющий сальник ( $P_{3A}$ ) с учетом того, что внутри запорной арматуры присутствует магистральное давление. Ряд величин формулы (1) определяется методом экспертной оценки или экспериментальным путем.

Величина технологических потерь при ТОР фильтров  $Y_{фильтр}$  будет зависеть от следующих величин:

- $n_{фильтр}$  – количество фильтров на конкретном маршруте транспортировки, шт;
- $P_{фильтр}$  – объем технологических потерь при однократном ТОР фильтра, м<sup>3</sup>;
- $P_{фильтр}$  – среднегодовое количество ТОР фильтров на конкретном маршруте транспортировки, раз

в год:

$$Y_{фильтр} = n_{фильтр} \cdot P_{фильтр} \cdot P_{фильтр}, \text{ м}^3. \quad (2)$$

При этом величина объем технологических потерь при однократном ТОР фильтра определяется методом экспертной оценки, среднегодовое количество ТОР фильтров, согласно сложившейся практике,  $P_{фильтр} = 4$  раза в год.

Величину технологических потерь при ТОР клапанов  $Y_{кл}$  предлагаем определять как

$$Y_{кл} = n_{кл} \cdot P_{ТОР\ кл} \cdot P_{кл} + n_{кл} \cdot P_{кл}, \text{ м}^3, \quad (3)$$

где  $n_{кл}$  – количество клапанов на конкретном маршруте транспортировки, шт;  
 $P_{ТОР\ кл}$  – объем технологических потерь при однократном ТОР клапана, м<sup>3</sup>;  
 $P_{кл}$  – среднегодовое количество ТОР клапанов на конкретном маршруте транспортировки, раз в год;  
 $P_{кл}$  – объем среднегодовых технологических потерь через сальник клапана, м<sup>3</sup>.

При этом величина объема технологических потерь при однократном ТОР клапана и объем среднегодовых технологических потерь через сальник клапана определяются методом экспертной оценки. Среднегодовое количество ТОР клапанов, согласно сложившейся практике,  $P_{кл} = 2$  раз в год.

Величина технологических потерь при ТОР насосного оборудования  $Y_{насос}$  будет зависеть от следующих величин:

- $n_{насос}$  – количество насосов на конкретном маршруте транспортировки, шт;
- $P_{насос}$  – объем технологических потерь при однократном ТОР насоса, м<sup>3</sup>;
- $P_{насос}$  – среднегодовое количество ТОР насосов на конкретном маршруте транспортировки, раз в год:

$$Y_{насос} = n_{насос} \cdot P_{насос} \cdot P_{насос}, \text{ м}^3. \quad (4)$$

Объем технологических потерь при однократном ТОР насоса определяется методом экспертной оценки. Среднегодовое количество ТОР насосов, согласно сложившейся практике,  $P_{насос} = 12$  раз в год.

В данном расчете учтено, что возможные протечки через торцевые уплотнения насосов собираются системой сбора утечек и возвращаются в перекачку, т.е. по сути не относятся к технологическим потерям.

Величина технологических потерь при ТОР камер приема/пуска (далее – КПП)  $У_{КПП}$  предлагаем определять по формуле

$$У_{КПП} = n_{КПП} \cdot П_{КПП} \cdot Р_{КПП}, \text{ м}^3, \quad (5)$$

где  $n_{КПП}$  – количество КПП на конкретном маршруте транспортировки, шт;  
 $П_{КПП}$  – объем технологических потерь при однократном ТОР КПП,  $\text{м}^3$ ;  
 $Р_{КПП}$  – среднегодовое количество ТОР КПП на конкретном маршруте транспортировки, раз в год.  
 Объем технологических потерь при однократном ТОР КПП определяется методом экспертной оценки.  
 Среднегодовое количество ТОР КПП, согласно сложившейся практике,  $Р_{КПП} = 4$  раза в год.

Величина технологических потерь при ТОР узлов учета ( $У_{УУ}$ ) будет зависеть от следующих величин:

- $n_{УУ}$  – количество узлов учёта на конкретном тарифном маршруте, шт;
- $П_{ТОР УУ}$  – объем технологических потерь при однократном ТОР узла учета,  $\text{м}^3$ ;
- $Р_{УУ}$  – среднегодовое количество ТОР узлов учета на конкретном маршруте транспортировки, раз в год;
- $П_{УУ}$  – объем среднегодовых технологических потерь при взятии проб нефти для лаборатории,  $\text{м}^3$ ;

$$У_{УУ} = n_{УУ} \cdot П_{ТОР УУ} \cdot Р_{УУ} + n_{УУ} \cdot П_{УУ}, \text{ м}^3. \quad (6)$$

При этом объем технологических потерь при однократном ТОР узла учета и объем среднегодовых технологических потерь при взятии проб нефти определяются методом экспертной оценки. Среднегодовое количество ТОР узлов учета, согласно сложившейся практике,  $Р_{УУ} = 4$  раза в год.

Величина технологических потерь при ТОР ЛЧ нефтепровода  $У_{ТОР ЛЧ}$  будет зависеть от следующих величин:

- $L_{ЛЧ}$  – длина трубопроводов маршрута транспортировки в одниточном исчислении, км;
- $П_{ЛЧ}$  – объем технологических потерь при однократном ТОР ЛЧ,  $\text{м}^3$ ;
- $K_{ЛЧ}$  – удельное среднегодовое количество ремонтов ЛЧ на конкретном маршруте транспортировки, раз в год;

$$У_{ТОР ЛЧ} = L_{ЛЧ} \cdot П_{ЛЧ} \cdot K_{ЛЧ}, \text{ м}^3, \quad (7)$$

При этом объем технологических потерь при однократном ТОР ЛЧ определяется методом экспертной оценки. Величина  $K_{ЛЧ}$  (удельное среднегодовое количество ремонтов ЛЧ на конкретном маршруте транспортировки) зависит от интенсивности ремонтов ЛЧ на предприятии и от относительной длины маршрута:

$$K_{ЛЧ} = \frac{N_t}{t} \cdot \frac{L_{т.м.}}{L_{сумм.}}, \text{ раз в год}, \quad (8)$$

где  $N_t$  – количество ремонтов за рассматриваемый период, шт;  
 $t$  – продолжительность рассматриваемого периода, лет;  
 $L_{т.м.}$  – длина маршруте транспортировки, км. К длине ЛЧ в одниточном исчислении прибавлены длины технологических трубопроводов всех насосных станций по пути следования;  
 $L_{сумм.}$  – суммарная длина всех нефтепроводов предприятия в одниточном исчислении, с учётом технологических трубопроводов насосных станций, км.

*Определение технологических потерь в резервуарных парках предприятий по транспорту нефти и нефтепродуктов.* При транспортировании нефти и нефтепродуктов на перекачивающей станции магистрального трубопровода проводят технологические операции в резервуарном парке, такие как заполнение емкости (прием), хранение продукта и опорожнение емкости (откачка). При этом могут быть использованы разные режимы эксплуатации резервуаров. Заполнение резервуара в полном объеме от минимального уровня взлива нефти (нефтепродуктов) (от приемо-раздаточных патрубков), с последующим опорожением в полном объеме до минимального уровня взлива нефти (нефтепродуктов), соответствует режиму эксплуатации резервуара по типу «мерник». Если уровень нефти (нефтепродуктов) в резервуаре характеризуется постоянным взливом продукта либо колеблется в пределах, установленных паспортом на резервуар, то режим эксплуатации резервуара характеризуется по типу «буферная емкость». Кроме этого, резервуар может и не использоваться при транспортировании нефти (нефтепродуктов) по тарифному маршруту, т.е. продукт будет проходить транзитом, мимо резервуарного парка. Схема использования (или неиспользования) емкости резервуарного парка определяется предприятием и закладывается в технологические режимы транспортирования нефти (нефтепродуктов) – в технологические карты.

Заполнение емкости нефтью (нефтепродуктами) способствует вытеснению паровоздушной смеси из газового пространства резервуара, т.е. происходит так называемый процесс «большого дыхания». Такие

дыхания не начинаются сразу с момента заполнения продуктом. Прием нефти (нефтепродуктов) сжимает паровоздушную смесь в газовом пространстве, и только затем происходит «выдох» углеводородов в атмосферу.

В результате опорожнения резервуара от нефти (нефтепродуктов), в насыщенное парами газовое пространство через оборудование, установленное на крыше, поступает атмосферный воздух, который уменьшает концентрацию паров в пространстве. Эта операция при эксплуатации резервуара приводит к активному процессу испарения углеводородов с поверхности «оставшейся» жидкости или с поверхности «мертвого» остатка в резервуаре. Процесс донасыщения газового пространства оставшимся продуктом изменяет парциальное давление, способствует повышению общего давления, что приводит к «обратному выдоху» смеси испарившихся углеводородов в атмосферу. Поэтому при нахождении технологических потерь для операций в резервуарном парке, таких как заполнение емкости (прием) и опорожнение емкости (откачка), следует вести расчет по отдельности для каждой операции.

В результате хранения нефти (нефтепродуктов) в газовом пространстве резервуара также происходит донасыщение паровоздушной смесью углеводородами, однако максимальные концентрации будут достигнуты примерно к четвертому дню хранения [3]. При такой технологической операции с резервуарами основным фактором влияния на технологические потери оказывает температурный фактор, и такие потери классифицируют как потери от «малых дыханий». Однако эти потери составляют около 10% от потерь при «больших дыханиях». Следовательно, в силу большей весомости рассмотрим технологические потери в резервуарных парках, которые образуются от «больших дыханий».

Учитывая сезонные изменения температурного режима в пределах Республики Беларусь при транспортировании нефти (нефтепродуктов), расчет предлагаем проводить по средним показателям температуры нефти (нефтепродуктов), плотности и давлению в осенне-зимний (с 1 октября по 31 марта) и весенне-летний (с 1 апреля по 30 сентября) периоды.

Влияние температурного режима нефти (нефтепродуктов) на технологические потери при испарении может быть значительным, если рассматривать тип расположения резервуара (наземный резервуар или подземный). Поэтому было принято решение провести расчет температурного режима нефти (нефтепродуктов), находящейся в резервуаре, с учетом всех типов резервуаров и их расположений, как указано в расчетно-экспериментальной методике<sup>3</sup>:

$$t_r = K_4 \cdot (K_1 + K_2 t_B + K_3 t_{ж}), \quad (9)$$

где  $t_B$ ,  $t_{ж}$  – среднеарифметические значения температур наружного воздуха<sup>4</sup> и продукта за соответствующие периоды года, °С;

$K_1, K_2, K_3$  – опытные коэффициенты, принимаем по Приложению Б к расчетной методике<sup>3</sup>;

$K_4$  – опытный коэффициент; для холодного периода года  $K_4$ , для теплого –  $K_4 = 1$  для подземно расположенных резервуаров, для наземно – принимаем по Приложению В к расчетной методике<sup>3</sup>.

Количество технологических потерь нефти (нефтепродуктов) при заполнении продуктом резервуара в сезонный период рассчитываются следующим формулам:

– в летний период

$$П_{л}^3 = \frac{P_{зв} \cdot m \cdot K_t^{\max} \cdot K_p \cdot K_{тр}^{cp} \cdot K_{об} \cdot K_{св} \cdot Q_n \cdot 0,294}{\rho_n \cdot 10^7}; \quad (10)$$

– в зимний период

$$П_{з}^3 = \frac{P_{зв} \cdot m \cdot K_t^{\min} \cdot K_{тр}^{cp} \cdot K_{об} \cdot K_{св} \cdot Q_n \cdot 0,294}{\rho_n \cdot 10^7}. \quad (11)$$

Общее количество технологических потерь при заполнении резервуара нефтью (нефтепродуктом) определим как сумму потерь (в среднем за год) в летний и зимний периоды:

$$П_{общ}^3 = П_{л}^3 + П_{з}^3, \quad (12)$$

<sup>3</sup> Методика расчетно-экспериментального определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу за счет испарения из емкостей хранения нефтепродуктов [Электронный ресурс]. – АОЗТ «Кубаньэко». – Краснодар, 1996. URL: <https://meganorm.ru/Data1/47/47365/index.htm>

<sup>4</sup> Справочник по климату Беларуси. В 5 ч. – Ч. 1. Температура воздуха и почвы. – Минск, 2017.

где  $Q_n$  – количество нефти (нефтепродуктов), перекачиваемое по магистральному трубопроводу, т;  
 $\rho_n$  – плотность нефти (нефтепродуктов), принимается по данным лаборатории предприятия, т/м<sup>3</sup>;  
 $P_{зв}$  – давление насыщенных паров жидких углеводородов при температуре 38 °С (по данным лаборатории), мм рт. ст.;

$K_t^{\max}$ ,  $K_t^{\min}$  – опытные коэффициенты, принимаются по Приложению 3 согласно методическим рекомендациям<sup>5</sup>;

$K_{тр}^{cp}$  – опытный коэффициент, принимается по Приложению 4 к методическим рекомендациям<sup>5</sup>;

$K_{об}$  – коэффициент оборачиваемости резервуара (или группы резервуаров), принимается по Приложению 1 к методическим рекомендациям<sup>5</sup>;

$K_p$  – опытный коэффициент, принимается по Приложению 5 к методическим рекомендациям<sup>5</sup>;

$K_{ссв}$  – опытный коэффициент эффективности работы средств сокращения выбросов, принимаем в зависимости от типа конструкции резервуара по Приложению Е к расчетной методике<sup>6</sup>;

$m$  – средняя молекулярная масса паров нефти (нефтепродуктов) (г/моль), рассчитывается в зависимости от температуры начала кипения углеводородов ( $t_{нк}$ ) по формуле<sup>7</sup>

$$m = 0,0043(212 + t_{нк})^{1,7}, \quad (13)$$

где  $t_{нк}$  – температура начала кипения нефти (нефтепродуктов), принимается по данным лаборатории предприятия, °С.

После опорожнения резервуара происходит донасыщение газового пространства, что приводит к изменению парциального давления в резервуаре, которое можно определить согласно п. 7.4.4.2<sup>8</sup> по формуле

$$P_{п} = p_{н.п.} \frac{h}{H}, \quad (14)$$

где  $p_{н.п.}$  – давление насыщенных паров продукта в летний и зимний периоды, принимается по данным лаборатории предприятия, мм рт. ст.;

$h$  – высота газового пространства в резервуаре до опорожнения нефти (нефтепродуктов), принимается по паспорту на резервуар, м;

$H$  – высота газового пространства в резервуаре после опорожнения нефти (нефтепродуктов), принимается по паспорту на резервуар, м.

Количество технологических потерь нефти (нефтепродуктов) при опорожнении из резервуара в сезонный период рассчитываются по следующим формулам:

– в летний период

$$П_{л}^0 = \frac{p_n \cdot m \cdot K_t^{\max} \cdot K_p \cdot K_{тр}^{cp} \cdot K_{об} \cdot K_{ссв} \cdot Q_n \cdot 0,294}{\rho_n \cdot 10^7}, \quad (15)$$

– в зимний период

$$П_{з}^0 = \frac{p_n \cdot m \cdot K_t^{\min} \cdot K_{тр}^{cp} \cdot K_{об} \cdot K_{ссв} \cdot Q_n \cdot 0,294}{\rho_n \cdot 10^7}, \quad (16)$$

Общее количество технологических потерь при опорожнении резервуара от нефти (нефтепродукта) определим как сумму (в среднем за год) потерь в летний и зимний периоды в среднем за год:

<sup>5</sup> Методические рекомендации по определению технологических потерь нефти из технологических резервуаров при добыче нефти [Электронный ресурс] / Министерство энергетики Российской Федерации. – 2015. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420285750>.

<sup>6</sup> Методика расчетно-экспериментального определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу за счет испарения из емкостей хранения нефтепродуктов [Электронный ресурс] / АОЗТ «Кубаньэко». – Краснодар, 1996. URL: <https://meganorm.ru/Data1/47/47365/index.htm>

<sup>7</sup> РД 153-39-018-97. Инструкция по нормированию технологических потерь нефти на нефтегазодобывающих предприятиях нефтяных компаний Российской Федерации [Электронный ресурс]: утв. Минтопэнерго Рос. Федерации, 16.06.1997. URL: <https://docs.cntd.ru/document/471808867>.

<sup>8</sup> ТКП 17.08-15-2011. Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Правила расчета выбросов от объектов нефтедобычи и газопереработки. URL: <https://www.ecoinfo.by/wp-content/uploads/2022/07/17.08-15-2011.pdf>

$$P_{\text{общ}}^0 = P_{\text{л}}^0 + P_{\text{л}}^0, \quad (17)$$

где  $Q_{\text{н}}$  – количество нефти (нефтепродуктов), перекачиваемое по магистральному трубопроводу, тонн;  
 $\rho_{\text{н}}$  – плотность нефти (нефтепродуктов), принимается по данным лаборатории предприятия, т/м<sup>3</sup>;  
 $K_t^{\text{max}}$ ,  $K_t^{\text{min}}$  – опытные коэффициенты, принимаются по Приложению 3 согласно методическим рекомендациям<sup>9</sup>;  
 $K_{\text{тр}}^{\text{ср}}$  – опытный коэффициент, принимается по Приложению 4 к методическим рекомендациям<sup>9</sup>;  
 $K_{\text{об}}$  – коэффициент оборачиваемости резервуара (или группы резервуаров), принимается по Приложению 1 к методическим рекомендациям<sup>9</sup>;  
 $K_p$  – опытный коэффициент, принимается по Приложению 5 к методическим рекомендациям<sup>9</sup>;  
 $K_{\text{ССВ}}$  – опытный коэффициент эффективности работы средств сокращения выбросов, принимаем в зависимости от типа конструкции резервуара по Приложению Е к расчетной методике<sup>10</sup>;  
 $m$  – средняя молекулярная масса паров нефти (нефтепродуктов) (г/моль), рассчитывается в зависимости от температуры начала кипения углеводородов ( $t_{\text{нк}}$ ) по формуле (13).

**Заключение.** В результате проведенных исследований разработана методика, позволяющая, в отличие от норм естественной убыли, обоснованно оценивать уровень технологических потерь при транспортировке нефти и нефтепродуктов в зависимости от конструктивных особенностей оборудования, заданного количества источников потерь, периодичности операций, физико-химических свойств перекачиваемого продукта. Методика прошла апробацию на предприятии по транспорту нефти и нефтепродуктов. Расчеты были проведены отдельно по маршрутам транспортировки. При этом количество оборудования (насосов, задвижек, клапанов, фильтров, узлов учета и др.) определялось по ЛЧ, ЛПДС и НПС магистральных трубопроводов с учетом согласованных схем движения нефти и нефтепродуктов.

Объективная и полная оценка технологических потерь дает возможность, с одной стороны, учитывать их при заключении договоров с контрагентами на транспортировку нефти и нефтепродуктов по конкретным тарифным маршрутам (участкам), с другой – разрабатывать мероприятия по обоснованному снижению уровня этих потерь и осуществлять выбор более оптимальных схем движения углеводородов по линейным и площадочным объектам нефтетранспортного предприятия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хамидуллина Ф.Ф., Хамидуллин Р.Ф. Методика выполнения расчетов технологических потерь нефти // Вестн. Казан. технол. ун-та. – 2011. – № 18. – С. 265–267.
2. Разработка нормативов технологических потерь нефти на Курмышском месторождении ОАО «МАКойл» / Ф.Ф. Хамидуллина, Р.Ф. Хамидуллин, А.А. Газизов и др. // Вестн. Казан. технол. ун-та. – 2012. – № 12. – С. 201–204.
3. Борьба с потерями нефти и нефтепродуктов при их транспортировке и хранении / Ф.Ф. Абузова, И.С. Бронштейн, В.Ф. Новоселов и др. – М.: Недра, 1981. – 248 с.

#### REFERENCES

1. Khamidullina, F.F. & Khamidullin, R.F. (2011). Metodika vypolneniya raschetov tekhnologicheskikh poter' nefti [Methodology for performing calculations of technological oil losses]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of the Kazan Technological University]*, (18). 265–267. (In Russ., abstr. in Engl.)
2. Khamidullina, F.F., Khamidullin, R.F., Gazizov, A.A. & Ivanov, D.V. (2012). Razrabotka normativov tekhnologicheskikh poter' nefti na Kurmyshskom mestorozh-denii ОАО «МАКoil» [Development of standards for technological losses of oil at the Kurmysh field of ОАО МАКoil]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of the Kazan Technological University]*, (12). 201–204. (In Russ., abstr. in Engl.)
3. Abuzova, F.F., Bronshtein, I.S., Novoselov, V.F., Rzhavskii, E.L. & Fokin, M.N. (1981). *Bor'ba s poteryami nefti i nefteproduktov pri ikh transportirovke i khranении*. Moscow: Nedra. (In Russ.)

Поступила 17.03.2023

<sup>9</sup> Методические рекомендации по определению технологических потерь нефти из технологических резервуаров при добыче нефти [Электронный ресурс] / Министерство энергетики Российской Федерации. – 2015. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420285750>.

<sup>10</sup> Методика расчетно-экспериментального определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу за счет испарения из емкостей хранения нефтепродуктов [Электронный ресурс] / АОЗТ «Кубаньэко». – Краснодар, 1996. URL: <https://meganorm.ru/Data1/47/47365/index.htm>

**DEVELOPMENT OF METHODOLOGY FOR DETERMINING  
TECHNOLOGICAL LOSSES OF OIL AND PETROLEUM PRODUCTS DURING TRANSPORTATION  
BY MAIN PIPELINE TRANSPORT**

**S. BASLAVIAK, A. KULBEL,  
A. YAKUBENKO, A. YANUSHONOK  
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)**

*During technological operations for the transportation of oil and oil products, there are losses of pumped products. Historically, these losses were recorded in accordance with the norms of natural loss, which are determined empirically and do not have a clear scientific justification. The article presents a methodological approach to determining the level of technological losses of oil and oil products during technological operations of transportation by main pipeline transport. All technological losses are divided into two groups: losses during maintenance and repair of pipeline equipment; losses due to evaporation from storage equipment. For each of the groups, a reasonable method for calculating technological losses is proposed, taking into account the peculiarities of equipment maintenance and the seasonal factor. The developed methodology can be used by oil and petroleum products transportation enterprises for an objective and complete assessment of technological losses, their subsequent.*

**Keywords:** *technological losses, oil, petroleum products, technical maintenance, pipeline, tank*

УДК 666(651+652)

DOI 10.52928/2070-1616-2023-48-2-94-100

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФАЗООБРАЗОВАНИЯ ПРИ СИНТЕЗЕ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО МАНГАНИТА ИТТРИЯ

канд. техн. наук *Н.Н. ГУНДИЛОВИЧ*, канд. техн. наук *Р.Ю. ПОПОВ*,  
канд. техн. наук, доц. *Е.М. ДЯТЛОВА*, *А.В. БУКА*, *А.Н. МАРИНЕНКО*  
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

Целью работы является установление характера и последовательности процессов фазообразования при синтезе керамических материалов на основе манганита иттрия с использованием оксидов марганца с разной степенью окисления и модификаторов структуры. В качестве методов исследования в работе использованы дифференциальная сканирующая калориметрия, рентгенофазовый анализ, электронная сканирующая микроскопия. Определены физико-химические и электрофизические свойства полученных образцов. Образцы модифицированного манганита иттрия получены твердофазным спеканием исходных компонентов при различных температурно-временных параметрах термообработки. Изучено влияние добавок  $Bi_2O_3$ ,  $CoO$  и  $TeO_2$  на физико-химические и электрофизические свойства опытных образцов. Установлены закономерности формирования структуры и фазового состава керамических материалов во взаимосвязи с составом сырьевых композиций и технологическими параметрами синтеза модифицированного манганита иттрия. Установлено, что введение оксидов типа  $RO$  способствует уменьшению степени закристаллизованности образцов, о чем свидетельствует снижение интенсивности дифракционных максимумов кристаллических фаз. При этом качественный состав фаз практически не изменяется, однако увеличивается доля аморфной составляющей в структуре материала. Наиболее эффективное модифицирующее воздействие при синтезе манганита иттрия оказывает  $Bi_2O_3$ . Его введение в состав сырьевой смеси интенсифицирует процесс формирования фазы манганита иттрия с размером кристаллов 2–4 мкм, что подтверждается результатами ДСК, РФА и электронной микроскопии. Интенсификация процесса кристаллизации за счет введения добавки оксида висмута объясняется развитым механизмом жидкофазного спекания и образованием значительного количества центров кристаллизации. Разработанные керамические материалы на основе модифицированного манганита иттрия обладают комплексом электрофизических характеристик, позволяющим рекомендовать их для изготовления различных элементов электронной техники.

**Ключевые слова:** манганит иттрия, твердофазное спекание, дифференциальная сканирующая калориметрия, рентгенофазовый анализ, электрофизические свойства, структура.

**Введение.** Интенсивное развитие электроники и приборостроения обусловило необходимость усовершенствования существующих и разработки новых материалов, обладающих заданным комплексом физико-химических и электрофизических свойств. Кроме того, развитие фундаментальной науки и практического материаловедения позволяет открывать все новые области применения существующих материалов.

В последние годы особый интерес проявляется к керамическим и композиционным материалам, сочетающим сегнетоэлектрические, магнитные, полупроводниковые и электрофизические характеристики, которые важны при разработке устройств нового поколения в современной электронной технике. К таким материалам относятся мультиферроики (материалы, обладающие одновременно двумя и более типами «ферро» упорядочения: ферромагнитное, сегнетоэлектрическое и сегнетоэластичность), а также композиции с колоссальным магнетосопротивлением и радиопоглощающими свойствами. Уникальные электрофизические и магнитные характеристики проявляются при структурных фазовых переходах, которые происходят при изменении температуры, давления в электрических и магнитных полях, а также при изменении концентраций в твердых растворах [1–3].

Наиболее перспективными с этой точки зрения являются манганиты, в структуре которых присутствуют катионы марганца с различной степенью окисления, взаимодействие между которыми с участием ионов кислорода обеспечивает перенос зарядов и высокие магнеторезистивные свойства. Также значительные перспективы имеют твердые растворы различных манганитов и ферритов [1–3].

В работе изучены процессы фазообразования в керамических материалах на основе модифицированного манганита иттрия, полученного твердофазным спеканием, а также исследована их структура, физико-химические и электрофизические свойства.

**Материалы и методы исследования.** В качестве исходных компонентов для синтеза модифицированных манганитов иттрия использовались следующие реактивы квалификации «химически чистый» («х.ч.»): оксид иттрия, оксид марганца (III), оксид марганца (IV). В качестве ионов-модификаторов выбраны соединения квалификации «х.ч.»: оксиды висмута (III), кобальта (II), теллура (IV). Содержание иона-модификатора варьировалось от 2 до 20 мас. %.

Исходные компоненты подвергались измельчению, затем смешивались согласно рассчитанным данным, полученная смесь обжигалась в электрической камерной печи при температуре 850 °С с выдержкой при 1 ч, с последующим подъемом температуры до 1200 °С с выдержкой при максимальной температуре 2 ч. После обжига спек измельчался в вибрационной мельнице, полученный порошок керамики смешивался со связкой, в роли которой применялась карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) в количестве 3–5 мас. % для улучшения формовочных свойств.

Формование образцов осуществлялось методом полусухого формования на гидравлическом прессе при давлении 30–50 МПа. Опытные образцы имели диаметр 12 мм, толщину 2–3 мм. Сформованные образцы направлялись на второй обжиг при температуре 1100–1300 °С с выдержкой при максимальной температуре 1–3 ч.

Термический анализ исследуемых образцов проводился при помощи дифференциального сканирующего калориметра DSC 404 F3 Pegasus (NETZSCH, Германия) в интервале температур 30–1300 °С, газовая среда – аргон (Ar), с предварительной изотермической выдержкой в течение 10 мин, скорость подъема температуры составляла 10 °С/мин.

Дифрактограммы получены на дифрактометре D8 ADVANCED фирмы Bruker с использованием  $\text{CuK}_\alpha$ -излучения при комнатной температуре в диапазоне углов  $2\Theta = 20\text{--}80^\circ$ . Расшифровка дифрактограмм осуществлялась по рентгенометрической картотеке. Определялись углы отражения ( $\Theta$ ) и межплоскостные расстояния  $d$ , соответствующие дифракционным максимумам.

Исследование структуры осуществлялось методом электронной микроскопии с использованием сканирующего электронного микроскопа ZEISS EVO 10 (Германия).

Определение кажущейся пористости, плотности, водопоглощения синтезированных материалов выполнялось в соответствии с ГОСТ 2409 методом насыщения и гидростатического взвешивания.

Удельное объемное электрическое сопротивление определялось на образцах в форме дисков диаметром 12 мм, толщиной 3 мм. Значения сопротивления измерялись с помощью зеркального гальванометра (метод непосредственного отклонения, метод сравнения отклонения и метод зарядки конденсатора по ГОСТ 30421).

Диэлектрическую проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь и активное сопротивление определялось при помощи измерителя иммитанса E7-23 (ГОСТ 30421).

Температуры точек Кюри и Нееля определялись исходя из данных, полученных при измерении удельного объемного сопротивления, диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь.

**Результаты и их обсуждения.** Для изучения процессов, происходящих при синтезе манганита иттрия, выполнена дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) исходных компонентов и экспериментальных смесей. На рисунке 1 представлены результаты ДСК оксидов марганца (III) и (IV).

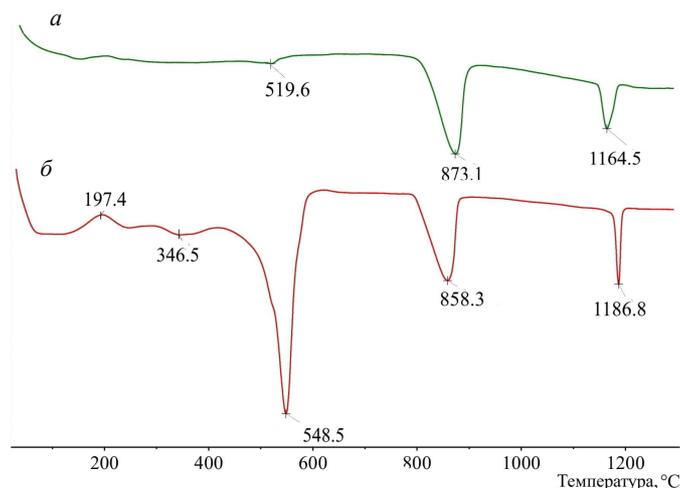


Рисунок 1. – Кривые ДСК  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  (а) и  $\text{MnO}_2$  (б)

На кривой ДСК  $\text{MnO}_2$  (рисунок 1, б) наблюдаются 4 эндотермических эффекта и 1 экзотермический. При температуре 197,4 °С экзотермический эффект связан с небольшим наличием оксида марганца (II), который окисляется и образует твердые растворы, охватывающие область составов от  $\text{MnO}$  до  $\text{MnO}_{1,15}$ . Эффект при температуре 346,5 °С свидетельствует о полиморфном превращении  $\text{MnO}_2$  из тетрагональной в ромбическую сингонию<sup>1, 2</sup>. Яркий выраженный эндотермический эффект при температуре 548,5 °С обусловлен переходом оксида марганца (IV) в оксид марганца (III), согласно уравнению реакции (1):



<sup>1</sup> Назаренко А.В., Рудская А.Г., Куприянов М.Ф. Эффекты замещения ионов иттрия редкоземельными элементами и ионов марганца двухвалентными ионами в мультиферроике  $\text{YMnO}_3$  (краткий обзор) // Физика бессвинцовых пьезоактивных и родственных материалов. Анализ современного состояния и перспективы развития: сб. тез. докл. / Ростов-на-Дону – Туапсе (02–06 сент. 2014 г.). – Ростов-на-Д., 2014. – С. 112–121.

<sup>2</sup> Рудская А.Г. Структура твердых растворов манганитов висмута-лантана // Физика бессвинцовых пьезоактивных и родственных материалов. Анализ современного состояния и перспективы развития: сб. тез. докл. / Ростов-на-Дону – Туапсе (02–06 сент. 2014 г.). – Ростов-на-Д., 2014. – С. 257–262.

После разложения диоксида марганца происходит образование  $\alpha$ - $Mn_3O_4$  (тетрагональная сингония) при температуре 858,3 °С, который при температурах свыше 1150 °С переходит в  $\gamma$ - $Mn_3O_4$  кубической сингонии согласно уравнениям реакции (2, 3) [4].



На кривой ДСК  $Mn_2O_3$  (см. рисунок 1, а) присутствуют 3 выраженных эндотермических эффекта. Эндотермический эффект при температуре 519,6 °С связан с восстановлением примесного оксида марганца (IV) до оксида марганца (III) согласно уравнению реакции (1). При температуре 873,1 °С  $Mn_2O_3$  переходит в  $\alpha$ - $Mn_3O_4$  по реакции (2). Эндотермический эффект при 1164,5 °С связан с полиморфизмом  $Mn_3O_4$ , описанным выше.

Кривые ДСК оксидов  $Y_2O_3$ ,  $CoO$  и  $TeO_2$  представлены на рисунке 2.

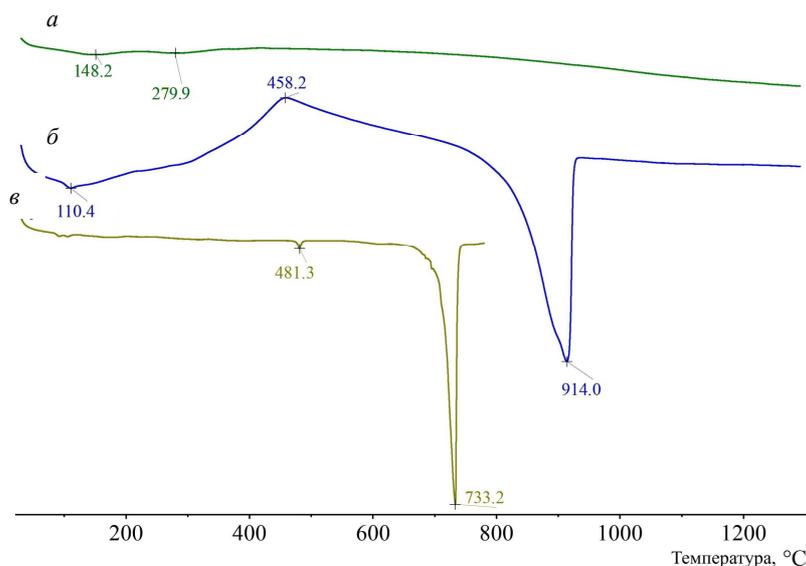


Рисунок 2. – Кривые ДСК  $Y_2O_3$  (а),  $CoO$  (б) и  $TeO_2$  (с)

На рисунке 2, а изображена кривая ДСК оксида иттрия, на которой наблюдаются 2 слабовыраженных эндотермических эффекта. Эндотермический эффект при температуре 148,2 °С связан с удалением физически связанной влаги. Термический эффект при температуре 279,9 °С связан с разложением образующегося при хранении гидроксида иттрия по уравнению химической реакции (4):



Кривая ДСК оксида кобальта (II) (см. рисунок 2, б) характеризуется наличием 2 эндотермических эффектов и 1 экзотермического: эндотермический эффект при 110,4 °С объясняется удалением физической влаги, экзотермический эффект при 458,2 °С обусловлен частичным окислением  $CoO$  до смешанного оксида кобальта (II, III) согласно уравнению реакции (5):



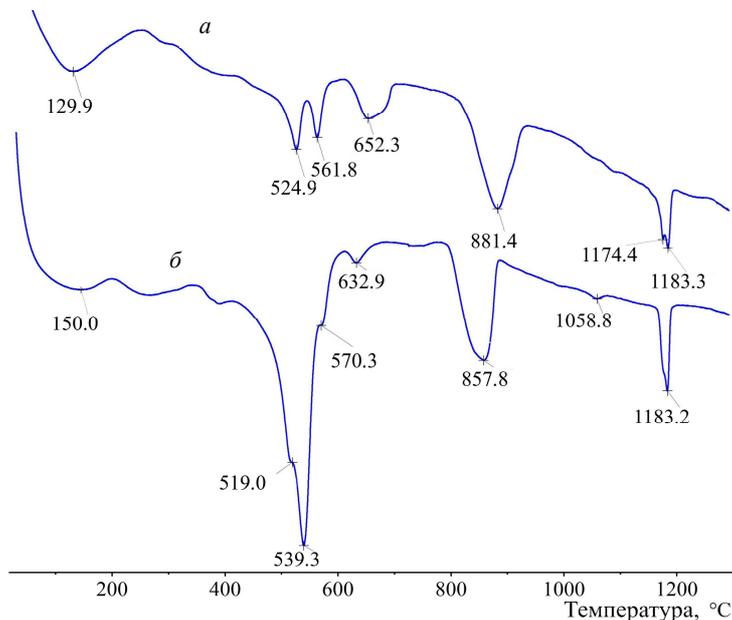
Эндотермический эффект при температуре 914 °С связан с полным восстановлением смешанного оксида кобальта (II, III) до оксида кобальта (II).

На рисунке 2, в, соответствующем оксиду  $TeO_2$ , присутствуют 2 термических эффекта: эндотермический эффект при температуре 481,3 °С связан с полиморфным превращением оксида теллура (II) из  $\alpha$ -ромбической модификации в  $\beta$ -тетрагональную. Ярко выраженный эндотермический эффект при температуре 733,2 °С обусловлен плавлением  $TeO_2$  ( $T_{пл.} = 733$  °С).

На рисунке 3 представлены кривые ДСК сырьевых смесей для получения манганита иттрия с использованием  $MnO_2$  и  $Mn_2O_3$ .

На рисунке 3, а представлена кривая ДСК смеси оксидов иттрия и марганца (III). Эндотермический эффект при температуре 129,9 °С объясняется удалением физически связанной влаги. Термические эффекты при температурах 524,9 °С и 561,8 °С связаны с переходом примесного оксида марганца (II) в оксид марганца (III) согласно реакции (1), причем введение оксида иттрия в состав сырьевых смесей способствует снижению температур указанных процессов. Эндотермический эффект при температуре 652,3 °С обусловлен полиморфизмом оксида иттрия. При температурах 881,4 °С и 1174,4 °С происходят полиморфные превращения оксида марганца,

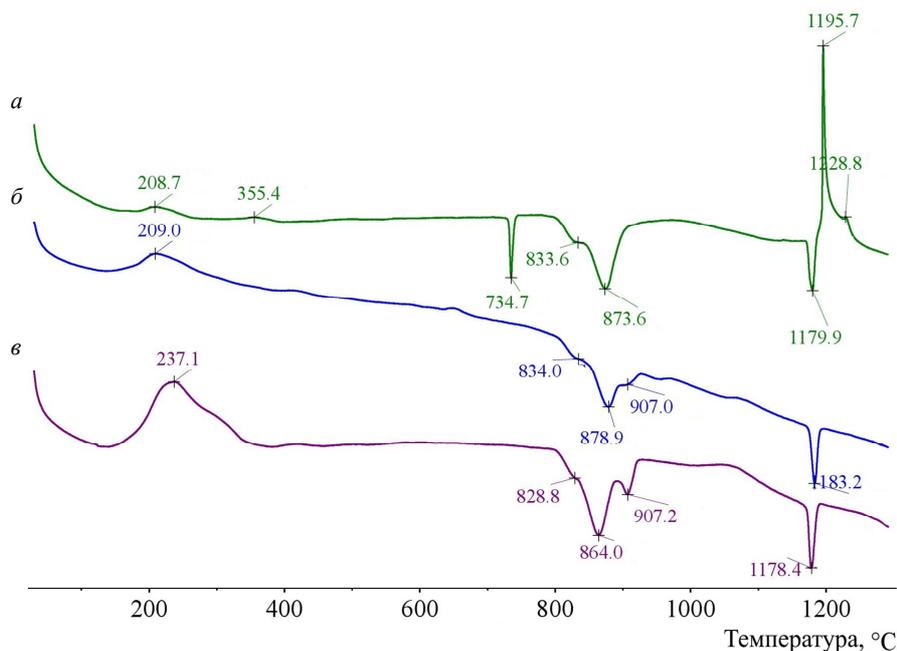
сопровождающиеся формированием  $\alpha\text{-Mn}_3\text{O}_4$  и  $\gamma\text{-Mn}_3\text{O}_4$  соответственно. Эндотермический эффект при температуре 1183,3 °C объясняется полиморфными превращениями смешанного оксида марганца (II, III).



**Рисунок 3. – Кривые ДСК опытных сырьевых смесей для получения манганита иттрия с использованием  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  (а) и  $\text{MnO}_2$  (б)**

Эндотермический эффект на кривой ДСК сырьевой смеси оксидов  $\text{Y}_2\text{O}_3$  и  $\text{MnO}_2$ , приведенной на рисунке 3, б, при температуре 150 °C обусловлен удалением физически связанной влаги. Термические эффекты в интервале температур 519,0–570,3 °C объясняются переходом оксида марганца (IV) в оксид марганца (III) согласно реакции (1). При 632,9 °C наблюдается эндотермический эффект, который вызван полиморфными превращениями  $\text{Y}_2\text{O}_3$ . Эндотермический эффект при температуре 857,8 °C обусловлен полиморфизмом оксида марганца (III), описанным уравнением реакции (2). Термический эффект при температуре 1183,2 °C связан с полиморфизмом  $\alpha$ -модификации смешанного оксида марганца (II, III).

Кривые ДСК сырьевых смесей для получения модифицированного манганита иттрия представлены на рисунке 4.



**Рисунок 4. – Кривые ДСК опытных сырьевых смесей для получения манганита иттрия в системах  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Mn}_2\text{O}_3\text{-Bi}_2\text{O}_3$  (а),  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Mn}_2\text{O}_3\text{-TeO}_2$  (б),  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Mn}_2\text{O}_3\text{-CoO}$  (в)**

На рисунке 4, *a* изображена кривая ДСК смеси оксидов иттрия, марганца (III) с добавкой оксида висмута (III). Экзотермический эффект при температурах 208,7 °С связан с окислением оксида марганца (II). Небольшой термический эффект при температуре 355,4 °С вероятно обусловлен изменением теплоемкости смеси. На кривых ДСК, приведенных на рисунке 4, не наблюдается характерный эффект в области температур 520–560 °С, поэтому можно предположить, что введение добавок  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TeO}_2$  и  $\text{CoO}$  препятствует переходу оксидов марганца в более низкую степень окисления. Эндотермический эффект при температуре 734,7 °С связан частичной потерей кислорода оксидом висмута и переходом из  $\alpha$ - в  $\delta$ -форму. Эндотермический эффект при температуре 833,6 °С обусловлен изменением теплоемкости и теплопроводности при превращениях оксидов марганца. Эндотермические эффекты при температурах 873,6 °С и 1179,9 °С связаны с превращением оксида марганца по уравнениям реакций (2) и (3). Экзотермические эффекты при температурах 1195,7 °С и 1228,8 °С, вероятно, обусловлены кристаллизацией нестехиометричных фаз по типу  $\text{Y}_{1-x}\text{Bi}_x\text{MnO}_3$ .

На рисунке 4, *б* изображена кривая ДСК смеси оксидов иттрия, марганца (III) с добавлением теллура (IV), на которой имеются 5 эндотермических эффектов и 1 экзотермический. Эффект при температуре 209 °С обусловлен процессами окисления оксида марганца (II). Присутствуют слабо выраженные термические эффекты при температурах 834,0 °С и 907,0 °С они связаны с различной теплоемкостью и теплопроводностью оксидов. Также менее выраженными по сравнению с исходным составом смеси являются эффекты при температурах 878,9 °С и 1183,2 °С, которые обусловлены превращением оксидов марганца согласно реакциям (2) и (3).

На рисунке 4, *в* представлена кривая ДСК смеси оксидов  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  с добавлением  $\text{CoO}$ . Температурный эффект при 237,1 °С вызван окислением оксида марганца (II). При температуре 864,0 °С происходит превращение  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  в  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ . Эндотермический эффект при температуре 907,2 °С обусловлен изменением теплофизических характеристик материала при превращениях  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ . При температуре 1178,4 °С происходит превращение  $\alpha$ - $\text{Mn}_3\text{O}_4$  в  $\gamma$ - $\text{Mn}_3\text{O}_4$ .

Активный процесс кристаллизации твердых растворов наблюдается только при введении оксида висмута (III), что объясняется развитым механизмом жидкофазного спекания и образованием значительного количества центров кристаллизации.

Для исследования фазового состава опытных образцов выполнен рентгенофазовый анализ опытных образцов, результаты которого представлены на рисунке 5.

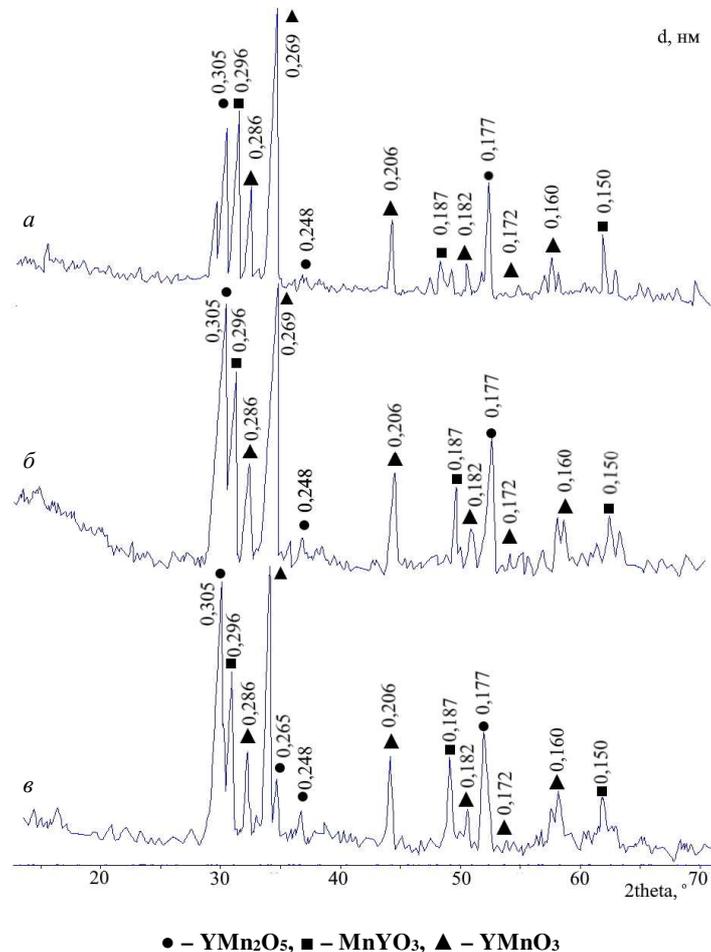


Рисунок 5. – Дифрактограммы опытных образцов, полученных в системах  $\text{Y}_2\text{O}_3$ – $\text{Mn}_2\text{O}_3$ – $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (*a*),  $\text{Y}_2\text{O}_3$ – $\text{Mn}_2\text{O}_3$ – $\text{TeO}_2$  (*б*),  $\text{Y}_2\text{O}_3$ – $\text{Mn}_2\text{O}_3$ – $\text{CoO}$  (*в*)

Анализ результатов РФА (см. рисунок 5) позволил установить, что фазовый состав синтезированных материалов представлен  $Y\text{Mn}_2\text{O}_5$ ,  $\text{MnYO}_3$  и  $Y\text{MnO}_3$ . Наибольшая интенсивность дифракционных максимумов  $Y\text{MnO}_3$  соответствует межплоскостному расстоянию 0,269 нм. Выявлено, что фазовый состав и степень совершенства кристаллической структуры материалов определяется режимом синтеза, а также природой и количеством иона-модификатора, введенного в состав сырьевой композиции, что позволяет получать материалы с заданной структурой и физико-химическими свойствами. Введение оксидов типа RO способствует уменьшению степени закристаллизованности образцов, о чем свидетельствует снижение интенсивности дифракционных максимумов кристаллических фаз. При этом качественный состав фаз практически не изменяется, однако увеличивается доля аморфной составляющей в структуре материала.

Электронно-микроскопические снимки опытных образцов представлены на рисунке 6.

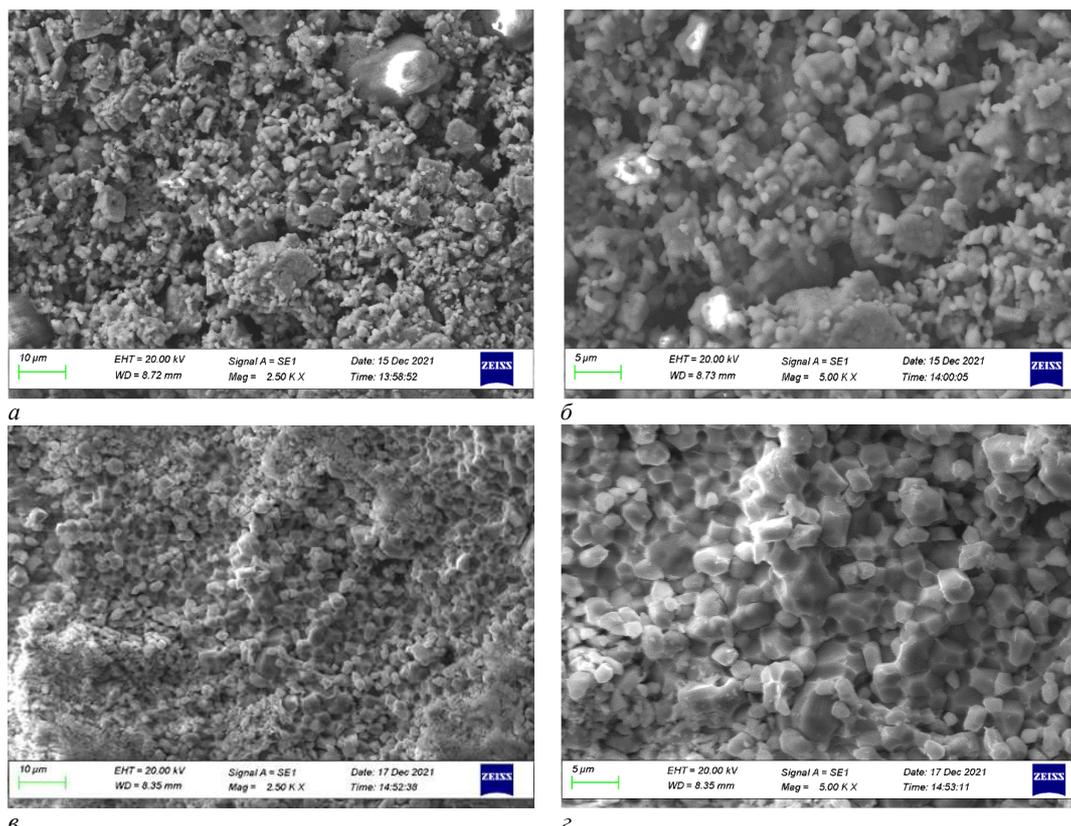


Рисунок 6. – Электронно-микроскопические снимки опытных образцов в системах  $Y_2O_3-Mn_2O_3$  (а, б),  $Y_2O_3-Mn_2O_3-Bi_2O_3$  (в, з)

Результаты исследования структуры опытных образцов (см. рисунок 6) показали, что структура полученных материалов характеризуется высокой степенью однородности на макроуровне, наблюдается наличие кристаллических образований, которые можно отнести к  $Y\text{MnO}_3$ , и пор. Введение добавки  $Bi_2O_3$  интенсифицирует процесс формирования фазы манганита иттрия с размером кристаллов 2–4 мкм (см. рисунок 6, в, з), что согласуется с результатами ДСК и РФА (см. рисунки 4 и 5).

На основе результатов проведенных исследований можно сделать вывод, что природа, количество ионов-модификаторов и режим обжига определяет фазовый состав, структуру и свойства опытных образцов.

Полученные в работе керамические материалы на основе модифицированного манганита иттрия обладают следующими характеристиками: диэлектрическая проницаемость – 75–620, тангенс угла диэлектрических потерь – 0,011–0,150, удельное объемное электросопротивление –  $(0,008-5,05) \cdot 10^6$  Ом·м, водопоглощение – 1,12–13,8 %, открытая пористость – 4,35–40,7 %, кажущаяся плотность – 2963–4225 кг/м<sup>3</sup>.

**Заключение.** На основании проведенного исследования установлен характер и последовательность процессов фазообразования при синтезе керамических материалов на основе манганита иттрия с использованием оксидов марганца с разной степенью окисления и модификаторов структуры.

Результаты термического анализа позволили определить температуры процессов, происходящих при синтезе модифицированных манганитов иттрия и установить, что введение добавок  $Bi_2O_3$ ,  $TeO_2$  и  $CoO$  препятствует переходу  $Mn_2O_3$  в более низкую степень окисления.

Фазовый состав синтезированных материалов представлен кристаллическими фазами  $Y\text{Mn}_2\text{O}_5$ ,  $\text{MnYO}_3$  и  $Y\text{MnO}_3$ . Выявлено, что фазовый состав и степень совершенства кристаллической структуры материалов определяется режимом синтеза, а также природой и количеством иона-модификатора, введенного в состав сырьевой компо-

зиции. Введение оксидов типа RO способствует уменьшению степени закристаллизованности образцов, о чем свидетельствует снижение интенсивности дифракционных максимумов кристаллических фаз. При этом качественный состав фаз практически не изменяется, однако увеличивается доля аморфной составляющей в структуре материала.

Установлено, что наиболее эффективное модифицирующее воздействие при синтезе манганита иттрия оказывает  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ . Его введение в состав сырьевой смеси интенсифицирует процесс формирования фазы манганита иттрия с размером кристаллов 2–4 мкм, что подтверждается результатами ДСК, РФА и электронной микроскопии. Интенсификация процесса кристаллизации за счет введения добавки оксида висмута объясняется развитым механизмом жидкофазного спекания и образованием значительного количества центров кристаллизации.

Разработанные керамические материалы на основе модифицированного манганита иттрия обладают комплексом электрофизических характеристик, позволяющим рекомендовать их для изготовления различных элементов электронной техники.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Макоед И.И. Получение и физические свойства мультиферроиков. – Брест: БрГУ, 2009. – 181 с.
2. Пятаков А.П., Звездин А.К. Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики // УФН. Обзоры актуальных проблем. – 2012. – Т. 182. – № 6. – С. 593–620.
3. Vasiliev A.V., Afanasiev A.M. Investigation of the physical and mechanical properties of radio-absorbing materials // Volgograd: NBI technologies. – 2020. – Vol. 14, № 4. – P. 28–32.
4. Особенности структурных состояний в твердых растворах  $\text{BiFeO}_3\text{--YMnO}_3$  / А.В. Назаренко, А.Г. Разумная, М.Ф. Куприянов и др. // Физика твердого тела. – 2011. – Т. 53, вып. 8. – С. 1523–1525.

#### REFERENCES

1. Makoed, I.I. (2009). *Poluchenie i fizicheskie svoystva mul'tiferroikov*. Brest: BrGU. (In Russ.)
2. Pyatakov, A.P. & Zvezdin, A.K. (2012). Magnitoelektricheskie materialy i mul'tiferroiki [Magnetolectric materials and multiferroics]. *UFN. Obzory aktual'nykh problem [UFN. Surveys of topical problems]*, Т. 182, (6), 593–620. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Vasiliev, A.V. & Afanasiev, A.M. (2020). Investigation of the physical and mechanical properties of radio-absorbing materials. *Volgograd: NBI technologies, 14(4)*, 28–32. (In Engl., abstr. in Russ.).
4. Nazarenko, A.V., Razumnaya, A.G., Kupriyanov, M.F., Kabirov, Yu.V., Rudskaya, A.G., Teslenko, P.Yu. & Kofanova, N.B. (2011). Osobennosti strukturnykh sostoyanii v tverdykh rastvorakh  $\text{BiFeO}_3\text{--YMnO}_3$  [Features of structural states in  $\text{BiFeO}_3\text{--YMnO}_3$  solid solutions]. *Fizika tverdogo tela [Solid State Physics]*, 53(8), 1523–1525.

Поступила 06.03.2023

### INVESTIGATION OF THE PHASE FORMATION PROCESS DURING THE SYNTHESIS OF CERAMIC MATERIALS BASED ON MODIFIED YTTRIUM MANGANITE

M. HUNDZILOVICH, R. POPOV, E. DYATLOVA, A. BUKA, A. MARINENKO  
(Belarusian State Technological University, Minsk)

*The aim of this work is to establish the nature and sequence of phase formation processes in the synthesis of ceramic materials based on yttrium manganite using different manganese oxides and structure modifiers. Differential scanning calorimetry, X-ray phase analysis, and scanning electron microscopy were used as research methods in the work. The physicochemical and electrophysical properties of the obtained samples were determined. Samples of modified yttrium manganite were obtained by solid-phase sintering of the initial components at various temperature-time parameters of heat treatment. The influence of  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CoO}$  and  $\text{TeO}_2$  additives on the physicochemical and electrophysical properties of prototypes was studied. Regularities of the structure formation processes and phase composition of ceramic materials are established in relation to the composition of raw materials and the technological parameters of the synthesis of modified yttrium manganite. It has been established that the addition of oxides of the RO type contributes to a decrease in the degree of crystallization of the samples, as evidenced by a decrease in the intensity of the diffraction peaks of the crystalline phases. In this case, the qualitative composition of the phases practically does not change, but the proportion of the amorphous component in the structure of the material increases.  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  has the most effective modifying effect in the synthesis of yttrium manganite. Its addition into the composition of the raw mixture intensifies the process of formation of the yttrium manganite phase with a crystal size of 2–4  $\mu\text{m}$ , which is confirmed by the results of DSC, XRD, and electron microscopy. The intensification of the crystallization process due to the addition of bismuth oxide is explained by the developed mechanism of liquid-phase sintering and the formation of a significant number of crystallization centers. The developed ceramic materials based on modified yttrium manganite have a set of electrophysical characteristics that make it possible to recommend them for the manufacture of various elements of electronic technology.*

**Keywords:** yttrium manganite, high temperature sintering, differential scanning calorimetry, x-ray phase analysis, electrophysical properties, structure.

УДК 665.777.4

DOI 10.52928/2070-1616-2023-48-2-101-107

**ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТИ  
И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОР ПО РАЗМЕРАМ НЕФТЯНОГО КОКСА  
ПРИ ЕГО ПРОКАЛКЕ В ПРИСУТСТВИИ ГИДРОКСИДА КАЛИЯ****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>**В.А. ЕМЕЛЬЯНОВА**ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0507-0206>*(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

*Изучено изменение характеристик поверхности и распределение пор в нефтяном коксе на стадии карбонизации при температуре 900 °С в присутствии гидроксида калия. Получены изотермы адсорбции и десорбции CO<sub>2</sub> при температуре 298 К образцов исходного и карбонизированного нефтяного кокса без и с добавкой гидроксида калия. Для анализа распределения пор по форме и размерам использован метод компьютерного моделирования GCMC (Grand Canonical Monte Carlo method). Выявлена закономерность изменения объема, удельной поверхности и распределения пор цилиндрической и щелевидной форм по размерам от количества гидроксида калия, вводимого перед стадией карбонизации в нефтяной кокс. Выявлена экстремальная зависимость изменения удельной поверхности и объема образующихся пор от содержания гидроксида калия в карбонизируемом коксе. Установлено, что при добавлении гидроксида калия менее 50% массовых происходит уменьшение содержащихся пор и снижение удельной поверхности карбонизированного кокса. При этом основной вклад в изменение величины удельной поверхности кокса вносят мезопоры щелевидной и цилиндрической форм, а также макропоры цилиндрической формы. Показано, что, изменяя количество вводимого гидроксида калия в нефтяной кокс перед его карбонизацией, можно регулировать распределение образующихся в нем пор по форме и размерам.*

**Ключевые слова:** нефтяной кокс, карбонизированный кокс, добавка гидроксида калия, адсорбция диоксида углерода, изотермы адсорбции, характеристики поверхности кокса, метод моделирования Монте-Карло (GCMC), распределение пор цилиндрической и щелевидной форм.

**Введение.** Одной из основных стадий производства углеродных сорбентов является карбонизация исходного сырья с последующей его парогазовой активацией, что позволяет получать продукт с заданными характеристиками, в частности, удельной поверхностью, объемом и распределением пор по размерам. В зависимости от способов и условий воздействия на сырье его структура может быть подвержена контролируемой модификации, что является основой получения продукта с требуемыми свойствами и структурой<sup>1</sup>.

Термическая обработка в инертной среде (карбонизация), широко применяемая в технологии получения активных углей, не позволяет создать условия для формирования первичной пористости у нефтяных коксов [1; 2]. Использование активных агентов, например, различных солей, кислот или щелочей, дает возможность при термообработке обеспечить формирование основы пористой структуры будущего активного угля. В исследованиях<sup>1</sup> [2] отмечается, что активированные угли с высокой удельной поверхностью могут быть получены активацией соединениями щелочных и щелочноземельных металлов. При этом наибольшая удельная поверхность достигается при использовании в качестве активирующего агента гидроксида калия<sup>2; 3</sup> [3; 4]. Необходимое отношение щелочи к коксу составляет от 2/1 [4], и в процессе активации из кокса удаляется углерод, переходя в оксиды углерода при взаимодействии с парами воды, которые образуются при термическом разложении гидроксида калия, восстановлении диоксида углерода до монооксида углерода, образовании карбоната калия и его взаимодействии с углеродом<sup>1</sup>.

Однако не изучен механизм формирования пористой структуры нефтяного кокса на стадии карбонизации в присутствии гидроксида калия. В частности, влияние количества вводимого при пропитке исходного нефтяного кокса гидроксидом калия на удельную поверхность карбонизированного продукта и распределение в нем пор по форме и размерам.

**Исследовательская часть.** В качестве объекта исследований использовался нефтяной кокс процесса замедленного коксования. Гранулометрический состав: менее 1,25 мм – 24,92% масс., от 1,0 до 1,25 мм – 30,10% масс., от 1,25 до 0,50 мм – 14,48% масс., от 0,5 до 2 мм – 30,5% масс. Микроструктура исследуемого

<sup>1</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.

<sup>2</sup> Чучалина И.А. Получение гранулированных активных углей с использованием в качестве связующих остаточных продуктов нефтепереработки и нефтехимии: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.07. – Пермь, 2018. – 169 л.

<sup>3</sup> Тагиров М.А. Технология получения активированного углеродного материала на основе нефтяного кокса: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.07. – Уфа, 2014. – 110 л.

кокса оценивается в 4 баллах по ГОСТ 26132, что соответствует средневолокнистой структуре. Насыпная плотность – 782,25 кг/м<sup>3</sup>. Содержание летучих соединений по ГОСТ 55660 составляет 8,5% масс. Содержание серы, определенное на элементном анализаторе UNICUBE, составляет 4,1% масс.

Введение гидроксида калия в образцы кокса осуществлялось путем их пропитки расчетным количеством 60% масс. водного раствора КОН в течение 2 ч. Затем образцы высушивали при температуре (105 ± 5) °С до постоянной массы и подвергали карбонизации.

Карбонизация исходного кокса и образцов с различным содержанием КОН проводилась в закрытых крышечкой тиглях в муфельной печи при температуре (900 ± 5) °С в течение 2 ч. После охлаждения до комнатной температуры образцы с добавкой КОН промывались на фильтре дистиллированной водой, затем разбавленным раствором серной кислоты до нейтральной реакции, а затем вновь дистиллированной водой для удаления солей сульфата калия. Промытые образцы сушили при температуре (105 ± 5) °С.

Изучение характеристик поверхности и распределения пор в исследуемых образцах кокса проводилось при помощи анализатора площади поверхности и распределения пор BELSOPR MAX. Перед проведением испытаний образцы подвергались сушке и дегазации под вакуумом при температуре 160 °С в течение часа. Далее были получены изотермы адсорбции и десорбции исследуемых образцов при температуре 298 К. В качестве адсорбтива использовался углекислый газ (рисунок 1).

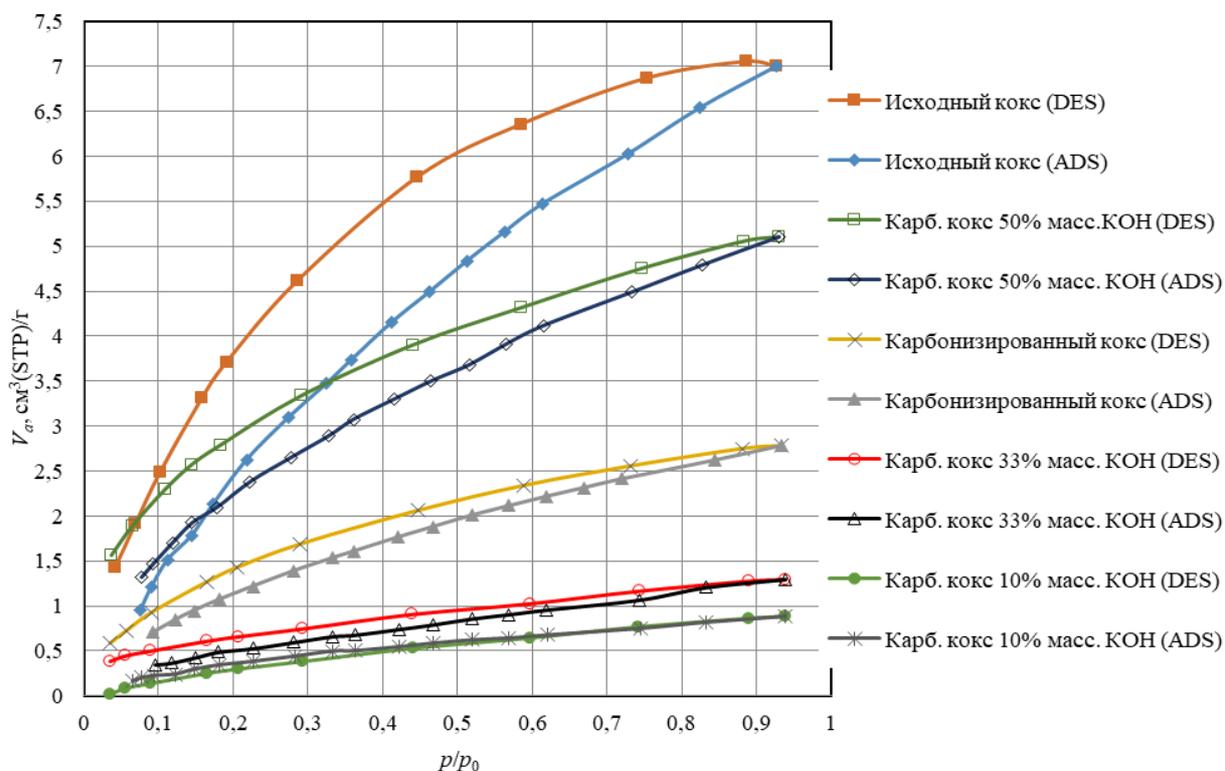


Рисунок 1. – Изотермы адсорбции (ADS) и десорбции (DES) CO<sub>2</sub> при температуре 298 К образцов исходного нефтяного кокса и карбонизированного нефтяного кокса без и с добавкой КОН

Полученные изотермы адсорбции/десорбции свидетельствует об относительно слабом взаимодействии CO<sub>2</sub> с поверхностью исследуемых образцов. Это подтверждается величиной констант адсорбционного равновесия, т.е. отношения констант скоростей адсорбции и десорбции, характеризующих прочность связи молекул адсорбируемого вещества с поверхностью адсорбента. При карбонизации исходного кокса, а также при введении в кокс перед стадией карбонизации КОН константа адсорбционного равновесия возрастает (таблица 1), что свидетельствует об усилении взаимодействия CO<sub>2</sub> с поверхностью карбонизированных образцов от 1,8 до 2,5 раза по сравнению с поверхностью исходного кокса. Характеристическая энергия адсорбции CO<sub>2</sub>, определенная по методу Дубинина–Астахова, у образцов карбонизированного кокса также выше, чем у исходного кокса (таблица 1).

Величина  $V_a$ , равная объему адсорбированного CO<sub>2</sub> при стандартных условиях на 1 г адсорбента, говорит об относительно низкой пористости исследуемых образцов. В ходе карбонизации суммарный объем пор, определенный по методу ВЕТ относительно исходного кокса, снижается более чем в 2,5 раза. Добавка в образец кокса перед карбонизацией КОН в количестве менее 33% масс. приводит к еще большему снижению суммарный объем пор. Так, при добавлении к исходному коксу 10% масс. КОН данный показатель снизился относительно исходного кокса в 8 раз, а относительно карбонизированного исходного кокса более чем в 3 раза. При этом с повышением содержания КОН в образце до 50% масс. суммарный объем пор превысил их объем в исходном карбонизированном коксе в 1,8 раза. Следовательно, количество вводимого в исходный нефтяной

кокс в процессе его пропитки КОН при определенных концентрациях может как увеличивать, так и уменьшать пористость кокса на стадии его карбонизации.

Очевидно, что при этом будет изменяться и удельная поверхность образцов карбонизированного нефтяного кокса, а также, что наиболее важно, распределение в нем пор по форме и размеру, что неизбежно повлияет на структуру получаемого сорбента при проведении стадии активации. Характеристики поверхности и распределения пор в образцах исходного, карбонизированного кокса и кокса с добавлением КОН приведены в таблице 1. Данные получены путем обработки изотерм адсорбции при помощи аналитического программного обеспечения BELMaster™ компании MicrotracBEL Corp. (Япония).

Таблица 1. – Характеристики поверхности и пор образцов нефтяного кокса (адсорбтив СО<sub>2</sub> при температуре 298 К)

| Показатель                                                                                                | Значение для образцов |                                                     |         |         |         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------|---------|---------|---------|
|                                                                                                           | исходный кокс         | кокс после карбонизации при содержании КОН, % масс. |         |         |         |
|                                                                                                           |                       | 0                                                   | 10      | 33      | 50      |
| Удельная площадь поверхности по методу ВЕТ, м <sup>2</sup> /г                                             | 17,715                | 6,4927                                              | 2,0700  | 2,6498  | 11,99   |
| Суммарный объем пор по методу ВЕТ, мм <sup>3</sup> /г                                                     | 19,274                | 7,6654                                              | 2,4350  | 3,5690  | 14,0450 |
| Средний диаметр пор по методу ВЕТ, нм                                                                     | 4,3520                | 4,7224                                              | 4,7054  | 5,3868  | 4,6858  |
| Удельная площадь поверхности по методу Ленгмюра, м <sup>2</sup> /г                                        | 84,533                | 24,282                                              | 7,230   | 11,037  | 39,819  |
| Константа адсорбционного равновесия – отношение констант скорости адсорбции/десорбции                     | 0,00978               | 0,01868                                             | 0,02057 | 0,01749 | 0,02501 |
| Потенциальная энергия адсорбции по методу ДА (метод Дубинина-Астахова), Дж/моль                           | 3,1974                | 4,1742                                              | 4,0795  | 4,3013  | 4,6197  |
| Суммарный объем пор щелевидной формы по методу GCMC, мм <sup>3</sup> /г, в т.ч.                           | 30,641                | 7,516                                               | 4,013   | 5,061   | 14,332  |
| – микропоры                                                                                               | 5,894                 | 3,259                                               | 1,002   | 1,139   | 6,129   |
| – мезопоры                                                                                                | 24,747                | 4,257                                               | 3,011   | 3,922   | 8,203   |
| Суммарный объем пор цилиндрической формы по методу GCMC, мм <sup>3</sup> /г, в т.ч.                       | 63,48                 | 24,69                                               | 6,90    | 7,99    | 41,96   |
| – микропоры                                                                                               | 2,10                  | 1,86                                                | 0,64    | 1,01    | 4,40    |
| – мезопоры                                                                                                | 7,54                  | 2,15                                                | 0,83    | 1,51    | 3,80    |
| – макропоры                                                                                               | 53,84                 | 20,68                                               | 5,43    | 5,47    | 33,76   |
| Суммарная удельная площадь поверхность пор щелевидной формы по методу GCMC, м <sup>2</sup> /г, в т.ч.     | 11,929                | 6,6383                                              | 1,8933  | 2,8145  | 12,8890 |
| – микропоры                                                                                               | 6,688                 | 4,5944                                              | 1,4465  | 1,8917  | 9,5541  |
| – мезопоры                                                                                                | 5,241                 | 2,0439                                              | 0,4468  | 0,9228  | 3,3349  |
| Суммарная удельная площадь поверхность пор цилиндрической формы по методу GCMC, м <sup>2</sup> /г, в т.ч. | 13,4030               | 7,7487                                              | 2,3101  | 3,5564  | 16,364  |
| – микропоры                                                                                               | 4,0853                | 4,6775                                              | 1,4008  | 2,4098  | 11,2340 |
| – мезопоры                                                                                                | 8,0497                | 2,4276                                              | 0,7996  | 0,9963  | 4,0370  |
| – макропоры                                                                                               | 1,2680                | 0,6436                                              | 0,1097  | 0,1503  | 1,0930  |

Анализ полученных результатов показал, что удельная площадь поверхности нефтяного кокса по методу ВЕТ в ходе карбонизации снижается в 2,7 раза. При введении в кокс перед карбонизацией путем пропитки до 33% масс. КОН значение данного показателя снижается еще в большей степени, что свидетельствует о том, что в процессе карбонизации нефтяного кокса в присутствии относительно небольшого количества КОН происходит уменьшение содержащихся в нем пор. При повышении содержания КОН в коксе до 50% масс. удельная поверхность кокса по методу ВЕТ в процессе карбонизации начинает увеличиваться. Аналогичная закономерность наблюдается и при оценке мономолекулярной адсорбции СО<sub>2</sub> образцами исследуемого кокса по методу Ленгмюра.

Средний диаметр пор, определенный по методу ВЕТ, увеличивается, что свидетельствует об изменении их распределения по размерам при карбонизации кокса как без, так и с добавлением КОН.

Для анализа распределения пор по размерам был использован метод компьютерного моделирования GCMC (Grand Canonical Monte Carlo method), в котором точно решается строгая молекулярно-уровневая модель адсорбции, основанная на выбранной модели формы пор [5–7]. Данный метод позволяет путем анализа изотерм адсорбции СО<sub>2</sub> при 298 К проводить оценку распределения пор щелевидной и цилиндрической форм в графитизированных углеродных материалах во всем диапазоне размеров от микро- до макропор. Согласно классификации Международного союза теоретической и прикладной химии (ИЮПАК), к микропорам относятся поры с диаметром менее 2 нм, к мезопорам с диаметром от 2 до 50 нм и к макропорам с диаметром 50 и более нм.

При использовании метода GCMC установлено, что в исследуемых образцах присутствуют микро-, мезо- и макропоры цилиндрической формы и микро- и мезопоры щелевидной формы. Распределение пор цилиндрической и щелевидной форм в образце исходного нефтяного кокса и влияние добавки КОН на изменение распределение пор в образцах карбонизированного нефтяного кокса представлено на рисунках 2 и 3.

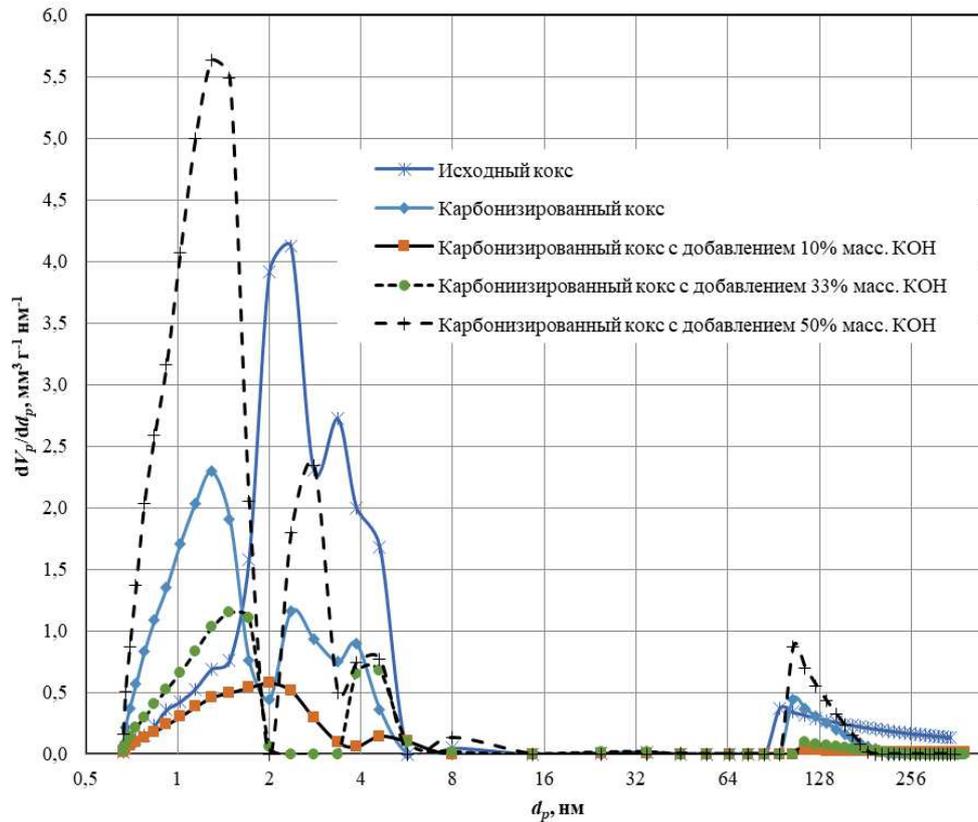


Рисунок 2. – Распределение пор цилиндрической формы в образце исходного нефтяного кокса и влияние добавки КОН на изменение распределение пор цилиндрической формы в образцах карбонизированного нефтяного кокса (метод GСМС)

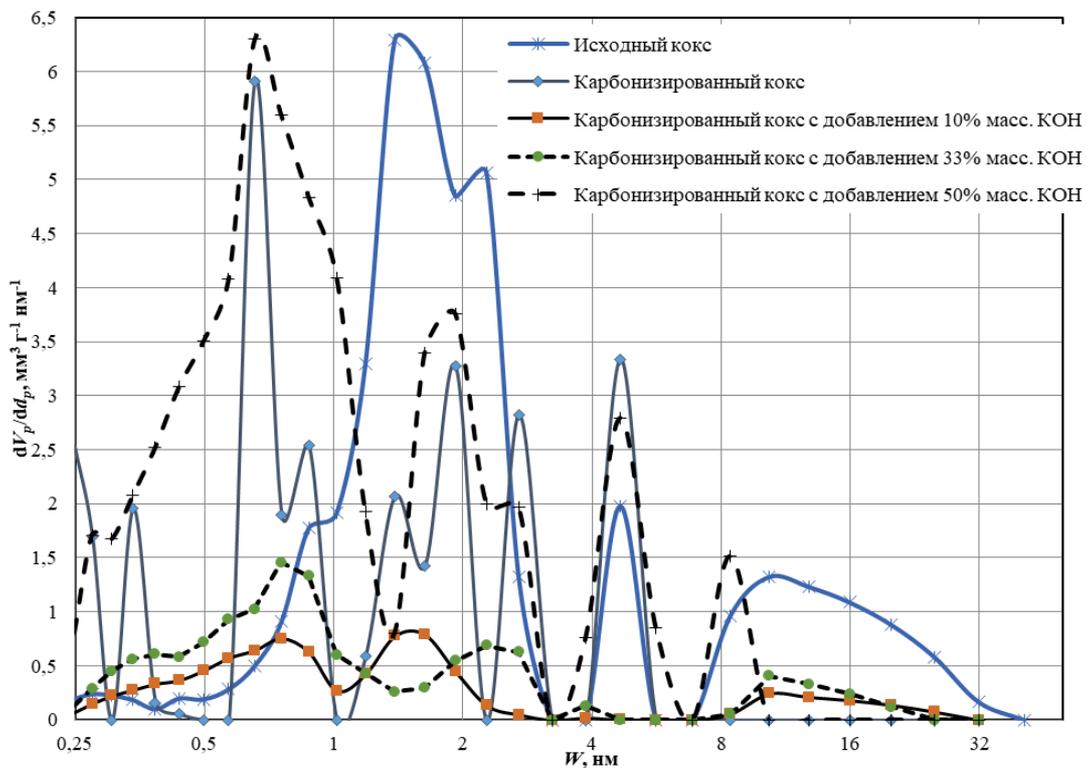
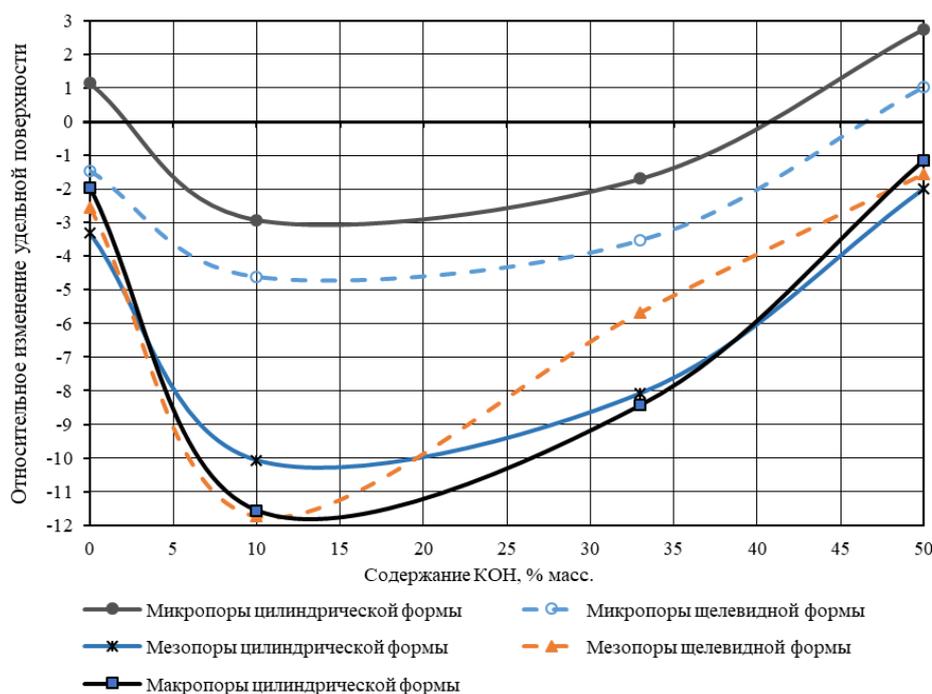


Рисунок 3. – Распределение пор шелевидной формы в образце исходного нефтяного кокса и влияние добавки КОН на изменение распределение пор шелевидной формы в образцах карбонизированного нефтяного кокса (метод GСМС)

При карбонизации нефтяного кокса суммарный объем в нем пор щелевидной и цилиндрической форм снижается соответственно в 4,1 и 2,6 раза (см. таблицу 1). При этом наибольшее уменьшение объема мезопор в 5,8 раза щелевидной формы и в 3,5 раза цилиндрической формы. Объем микропор щелевидной формы снижается на 44,7%, а цилиндрической формы – на 11,4%. Объем макропор цилиндрической формы в процессе карбонизации исходного кокса снижается в 2,6 раза. Аналогичные тенденции наблюдаются и в изменениях удельной площади поверхности пор. Однако данный показатель у микропор цилиндрической формы при карбонизации увеличивается на 0,5922 м<sup>2</sup>/г, или 14,5%. При этом формируются микропоры цилиндрической формы с меньшим средним диаметром (см. рисунок 2). При карбонизации кокса также происходит формирование микропор щелевидной формы с меньшей средней шириной, чем в исходном коксе (см. рисунок 3). При этом микропор щелевидной формы по объему образуется больше, чем микропор цилиндрической формы.

После пропитки нефтяного кокса раствором КОН в результате его карбонизации наблюдаются следующие закономерности. Добавление 10% масс. КОН к нефтяному коксу после его карбонизации приводит к значительному уменьшению объема и удельной поверхности всех видов пор как относительно исходного нефтяного кокса, так и карбонизированного кокса без добавления КОН. Суммарный объем пор щелевидной формы относительно исходного и карбонизированного кокса уменьшается соответственно в 7,6 и 1,3 раза, а их удельная поверхность в 6,3 и 3,5 раза. Объем пор цилиндрической формы при добавлении 10% масс. КОН уменьшается в большей степени – в 9,2 и 3,6 раза. При этом суммарная удельная площадь поверхности всех видов пор снижается в 5,8 и 3,3 раза. Основной вклад в изменение величины удельной поверхности вносят мезопоры щелевидной и цилиндрической форм, а также макропоры цилиндрической формы (рисунок 4).



**Рисунок 4. – Влияние содержания КОН в исходном коксе перед его карбонизацией на относительное изменение удельной поверхности пор**

С увеличением содержания КОН в коксе изменение поверхности пор всех видов уменьшается. При содержании КОН 50% масс. площадь щелевидных и цилиндрических микропор становится больше, чем у карбонизированного кокса без добавления КОН, а изменение площади мезо- и макропор становится приблизительно одинаковым.

Анализ влияния добавки КОН в исходный нефтяной кокс перед его карбонизацией показал, что при повышении содержания КОН до 50% масс. наблюдается формирование мезопор цилиндрической и щелевидной форм с диаметром и шириной от 2 до 8 нм. Без добавления КОН в процессе карбонизации в коксе присутствуют мезопоры указанной вышеупомянутых форм с размером до 4,6 нм.

В исходном коксе присутствуют макропоры цилиндрической формы с размером от 95 до 345 нм. При его карбонизации диаметр макропор находится в пределах от 105 до 205 нм. Добавление небольшого количества КОН способствует практически полному удалению макропор, а затем при повышении содержания КОН до 50% масс. формируются макропоры с диаметром от 105 до 185 нм.

**Заключение.** Полученные результаты свидетельствуют о наличии экстремальной зависимости изменения удельной поверхности и объема образующихся пор от содержания гидроксида калия в карбонизируемом коксе. При добавлении гидроксида калия менее 50% масс. происходит уменьшение содержащихся пор и снижение удельной поверхности карбонизированного кокса. При этом основной вклад в изменение величины удельной поверхности кокса вносят мезопоры щелевидной и цилиндрической форм, а также макропоры цилиндрической формы. Таким образом, изменяя количество вводимого гидроксида калия в нефтяной кокс перед его карбонизацией, можно регулировать распределение образующихся в нем пор по форме и размерам, что позволит получать углеродные сорбенты на основе нефтяного кокса с заданными характеристиками. Например, при прокалке нефтяного кокса в присутствии небольшого количества гидроксида калия может быть получен непокрытый углеродный адсорбент, который потенциально может найти применение в хроматографическом анализе смеси изомеров органических соединений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Южно Д.С., Ермак А.А., Сябарева Е.В. Изучение свойств прокаленного нефтяного кокса, полученного из дистиллятного и остаточного сырья // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2022. – № 10(46). – С. 110–114.
2. Исследование возможности переработки нефтяного кокса с повышенным содержанием летучих веществ в углеродные сорбенты / Е.А. Фарберова, А.С. Максимов, Е.А. Тиньгаева и др. // Изв. высш. учеб. заведений. Сер. Химия и хим. технология. – 2021. – Т. 64, Вып. 4. – С. 92–99. DOI: 10.6060/ivkkt.20216404.6331
3. Влияние характеристик связующих на параметры пористой структуры гранулированных активных углей на базе нефтяных коксов / В.А. Стрелков, А.С. Ширкунов, В.Г. Рябов и др. // Вестн. Перм. нац. исследоват. политехн. ун-та. Хим. технология и биотехнология. – 2021. – № 1. – С. 66–81. DOI: 10.15593/2224-9400/2021.1.06
4. 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
5. Modelling and Simulation in the Science of Micro- and Meso-Porous Materials / Eds.: C. Richard A. Catlow, Veronique Van Speybroeck and Rutger A. van Santen. – London, UK: Elsevier, 2017. – 370 p. DOI: 10.1016/C2015-0-04040-0
6. Adsorption equilibrium of polar/non-polar mixtures on MCM-41: experiments and Monte Carlo simulation / J.-H. Yun, Y. He, M. Otero et al. // Studies in Surface Science and Catalysis. Characterization of Porous Solids VI. – 2002. – Vol. 144. – P. 685–692. DOI: 10.1016/S0167-2991(02)80197-5
7. Monte Carlo Simulation and Experimental Studies of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and Their Mixture Capture in Porous Carbons / P. Kohmucan, W. Inthomya, A. Wongkoblap et al. // Molecules. – 2021. – Vol. 26, Iss. 9. – 2413. DOI: 10.3390/molecules26092413

## REFERENCES

1. Yukhno, D.S., Ermak, A.A. & Syubareva, E.V. (2022). Izuchenie svoystv prokalennogo neftyanogo koksa, poluchennogo iz distillyatnogo i ostatochnogo syr'ya [Study of the properties of calcined petroleum coke obtained from distillate and residual raw materials]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Bulletin of the Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science]*, 10(46), 110–114. (In Russ., abstr. in Engl.)
2. Farberova, E.A., Maksimov, A.S., Tin'gaeva, E.A., Shirkunov, A.S., Ryabov, V.G. & Strelkov, V.A. (2021). Issledovanie vozmozhnosti pererabotki neftyanogo koksa s povyshennym soderzhaniam letuchikh ve-shchestv v uglerodnye sorbenty [Investigation of the possibility of processing petroleum coke with a high content of volatile substances into carbon sorbents]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriya «Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya» [News of higher educational institutions. Series “Chemistry and Chemical Technology”]*, 64(4), 92–99. DOI: 10.6060/ivkkt.20216404.6331 (In Russ., abstr. in Engl.)
3. Strelkov, V.A., Shirkunov, A.S., Ryabov, V.G., Chuchalina, A.D., Shneider, A.V., Lokteev, D.V. & Kifel', N.D. (2021). Vliyanie kharakteristik svyazuyushchikh na parametry poristoi struktury granulirovannykh aktivnykh uglei na baze neftyanikh koksov [Influence of characteristics of binders on the parameters of the porous structure of granulated active carbons based on petroleum cokes]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledova-tel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Chemical technology and biotechnology]*, (1), 66–81. DOI: 10.15593/2224-9400/2021.1.06 (In Russ., abstr. in Engl.)
4. Kugatov, P.V. & Zhirnov, B.S. (2020). Formovannyi uglerodnyi adsorbent na osnove aktivirovannogo gidroksidom kaliya neftyanogo koksa [Molded carbon adsorbent based on potassium hydroxide-activated petroleum coke]. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel [Chemistry and technology of fuels and oils]*, (3), 22–25. (In Russ., abstr. in Engl.)
5. Catlow, C. Richard A. (Ed.), Van Speybroeck, Veronique (Ed.) & Van Santen, Rutger A. (Ed.). (2017). *Modelling and Simulation in the Science of Micro- and Meso-Porous Materials*. London, UK: Elsevier. DOI: 10.1016/C2015-0-04040-0
6. Yun, J.-H., He, Y., Otero, M., Düren, T. & Seaton, N. A. (2002). Adsorption equilibrium of polar/non-polar mixtures on MCM-41: experiments and Monte Carlo simulation. *Studies in Surface Science and Catalysis. Characterization of Porous Solids VI*, (144), 685–692. DOI: 10.1016/S0167-2991(02)80197-5 (In Engl.)
7. Kohmucan, P., Inthomya, W., Wongkoblap, A. & Tangsatitkulchai, C. (2021). Monte Carlo Simulation and Experimental Studies of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and Their Mixture Capture in Porous Carbons. *Molecules*, 26(9), 2413. DOI: 10.3390/molecules26092413 (In Engl.)

Поступила 24.02.2023

**CHANGES OF SURFACE CHARACTERISTICS  
AND PORE SIZE DISTRIBUTION OF PETROLEUM COKE  
DURING ITS CALCINATION IN THE PRESENCE OF POTASSIUM HYDROXIDE**

**D. YUKHNO, A. YERMAK, V. YEMELYANOVA**  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

*Change of surface properties and pore distribution in petroleum coke at carbonization stage at 900 °C in presence of potassium hydroxide has been studied. CO<sub>2</sub> adsorption and desorption isotherms at 298 K have been obtained for samples of raw and carbonized petroleum coke without and with potassium hydroxide addition. For pore shape and size distribution analysis GCMC (Grand Canonical Monte Carlo) computer simulation method has been used. Regularity of changes in volume, specific surface area and distribution of cylindrical and slit-shaped pores depending on the amount of potassium hydroxide added prior to carbonization stage in petroleum coke has been revealed. Extreme dependence of change in specific surface area and pore volume on potassium hydroxide content in carbonized coke has been identified. It has been found that addition of potassium hydroxide of less than 50% wt. reduces pore quantity and specific surface area of carbonized coke. The main contribution to the coke specific surface area is made by slit-shaped and cylindrical mesopores, as well as cylindrical macropores. It has been shown that by varying the amount of potassium hydroxide added to petroleum coke prior to its carbonization it is possible to regulate the formed pores distribution in terms of shape and size.*

**Keywords:** *delayed coking coke, carbonized coke, calcium hydroxide additive, carbon dioxide adsorption, adsorption isotherms, coke surface characteristics, Grand Canonical Monte Carlo method, distribution of cylindrical and slit-shaped pores.*

УДК 66.021.3

DOI 10.52928/2070-1616-2023-48-2-108-112

**ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ОПОРНО-РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ РЕШЕТОК  
НА ГИДРОДИНАМИКУ В МАССООБМЕННОМ АППАРАТЕ  
С ПОДВИЖНОЙ ШАРОВОЙ НАСАДКОЙ**

**Р.И. ЛАНКИН, канд. техн. наук, доц. В.С. ФРАНЦКЕВИЧ  
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)**

*В химической, а также нефтехимической, строительной, металлургической, горно-химической и других промышленности используются насадочные и тарельчатые колонны для процесса массообмена. В статье дано краткое представление о насадочных колоннах и их применении. Изложен принцип работы подвижных насадок, а также указаны их основные недостатки. Описана экспериментальная абсорбционная колонна и методика проведения экспериментальных исследований. По результатам экспериментов построены графики зависимости гидравлического сопротивления опорно-распределительных решеток от скорости газа, подвижных шаровых насадок с использованием этих решеток как с орошением, так и без него.*

**Ключевые слова:** абсорбция, опорно-распределительная решетка, подвижная насадка, гидравлическое сопротивление.

**Введение.** Развитие промышленности с ростом объема производства сопровождается выбросами промышленных газов в атмосферу. Очистка отходящих газов должна обеспечить утилизацию ценных компонентов и охрану окружающей среды от загрязнения. Как правило, на очистку поступает большой объем газовой фазы, при этом требуется высокая степень извлечения компонентов [1; 2].

Абсорбция и десорбция являются основными областями применения колон с неупорядоченными элементами насадок, поскольку процессы разделения проходят в основном в умеренном диапазоне температур. Особое внимание должно быть уделено насадочным телам с произвольным заполнением, которые характеризуются низким перепадом давления, малым удельным весом, хорошей смачиваемостью жидкостью, что приводит к уменьшению размеров конструкции и снижению эксплуатационных расходов. Расхождение между неупорядоченными и структурированными насадками с точки зрения гидравлического и массообменного поведения за последние 10 лет уменьшилось [3].

Широкое применение получили абсорбционные аппараты с подвижной насадкой. Такие аппараты просты по конструкции и эффективны. Одним из существенных преимуществ является возможность эксплуатации с жидкостями, которые в контакте с газами выделяют твердую фазу и забивают тарелки, решетки и насадки обычных абсорберов [4]. Они отличаются от других классов массообменных аппаратов тем, что насадочные тела совершают хаотичные движения, а пройденный путь каждого элемента насадки отличается и по-своему уникален, что значительно усложняет их исследование [5; 6].

Подвижная насадка в абсорбционном аппарате действует как устройство для диспергирования жидкости, а также распределения газа по всему объему сечения слоя, что увеличивает степень использования кинетической энергии газа и позволяет работать с высоким КПД на распределительных устройствах с большим свободным сечением [4].

Недостатками таких аппаратов, отмеченными в процессе эксплуатации, можно считать неравномерное распределение газовой фазы в надрешеточном пространстве как по сечению, так и по высоте аппарата, а также образование застойных зон в слоях насадки [2].

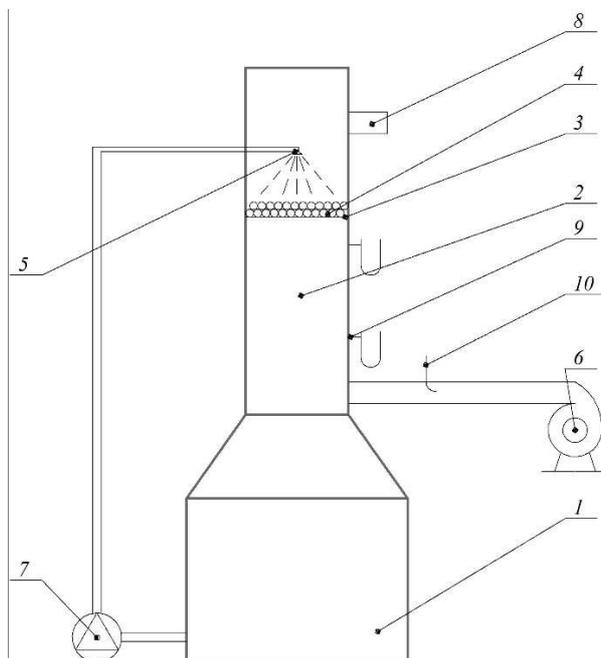
**Основная часть.** Один из наиболее эффективных способов очистки промышленного воздуха является мокрая очистка газов. Аппараты мокрого пылеулавливания отличаются простотой конструкции. Довольно часто используются аппараты с подвижной насадкой, несмотря на то что они появились сравнительно недавно<sup>1</sup>.

Насадка, находящаяся внутри абсорбера, удерживается в псевдооживленном состоянии газовым потоком. Жидкость, которая поступает в абсорбер, создает пленку, обтекающую поверхность насадочных элементов, или может находиться в виде струй или капель, распределенных в газе<sup>2</sup>. Течение потоков в подвижной насадке относится к одной из труднорешаемых задач газожидкостной механики.

<sup>1</sup> Ланкин Р.И., Францкевич В.С., Шаповалов Ю.П. Гидродинамика в аппаратах с подвижной насадкой // Нефтехимия-2021: материалы IV Междунар. науч.-техн. форума по хим. технологиям и нефтегазопереработке / Минск (22–24 нояб. 2021 г.) – Минск: БГТУ, 2021. – С. 228–231.

<sup>2</sup> Ланкин Р.И., Францкевич В.С. Гидравлическое сопротивление абсорбционной колонны с подвижной насадкой // Химическая технология и техника: материалы 86-й науч.-техн. конф. професс.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов / Минск (31 янв. – 12 февр. 2022 г.) – Минск: БГТУ, 2022. – С. 148–151.

Объектом исследования является абсорбционная установка (рисунок 1). В колонне размещена одна сменная опорно-распределительная решетка провального типа. На решетке располагается насадка, насыпанная в 4 слоя. В качестве насадочных тел использовался вспученный полистирол шарообразной формы диаметром 29 мм.



1 – резервуар; 2 – корпус аппарата; 3 – опорно-распределительная решетка; 4 – насадка; 5 – форсунка; 6 – вентилятор; 7 – насос; 8 – выходной патрубок; 9 – клапан для измерения перепада давления с U-образными дифманометрами; 10 – трубка Пито

Рисунок 1. – Экспериментальный абсорбер

Экспериментальная абсорбционная колонна состоит из цилиндрического резервуара 1 с конической частью, на которой с помощью фланцевого соединения закреплен цилиндрический вертикальный корпус 2. Внутри установлена опорно-распределительная решетка 3 с насыпанной на нее шаровой насадкой 4.

Газ при работе абсорбера движется в пустотах между насадочными телами и внутри их противотоком по отношению к жидкости, циркулирующей по замкнутому контуру.

Перед началом работы резервуар 1 заполнялся водой, из которого жидкость нагнеталась насосом 7 и поступала в колонну. Для равномерной подачи жидкости по сечению аппарата предусмотрена форсунка 5. Под действием силы тяжести она стекает обратно в резервуар. Воздух подавался с помощью вентилятора 6, проходил через колонну и покидал ее через выходной патрубок 8.

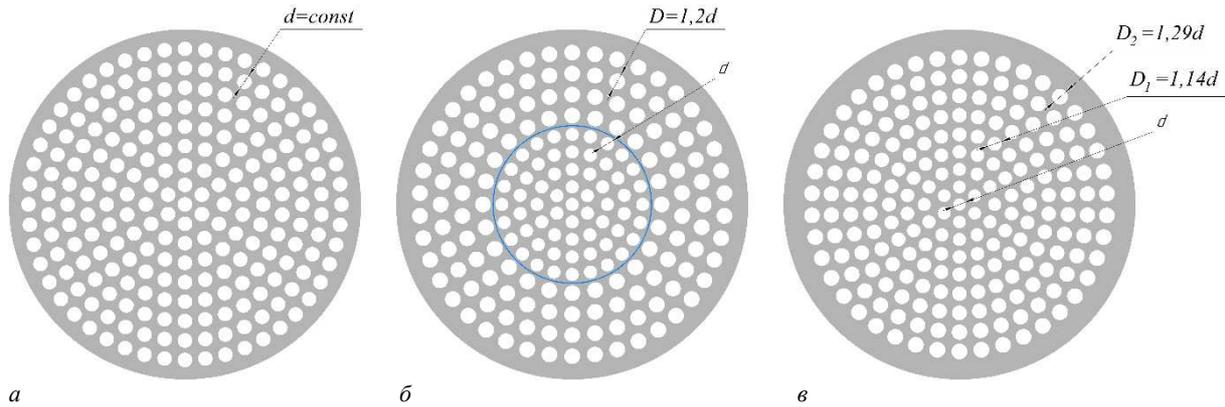
Расход воды измерялся расходомером. Регулировка расхода воздуха происходила изменением частоты вращения рабочего колеса частотным преобразователем. Расход воздуха определялся дифманометром, соединенным с трубкой Пито 10, перепад давления – через клапан для измерения перепада давления U-образным дифманометром 9. В ходе проведения эксперимента были изготовлены три типа опорно-распределительных решеток<sup>3</sup> (рисунок 2).

Изготовленные решетки можно классифицировать по конструкции:

- опорно-распределительная решетка типа 1 (рисунок 2, а) представляет собой решетку провального типа, в которой диаметры имеют один размер и расположены по концентрическим окружностям;
- опорно-распределительная решетка типа 2 (рисунок 2, б) – решетку провального типа, в которой центральные диаметры занимают 20% площади решетки. А отверстия, находящиеся на периферийной части, на 20% большего диаметра и занимают оставшуюся часть решетки. Отверстия расположены по концентрическим окружностям;
- опорно-распределительная решетка типа 3 (рисунок 2, в) – решетку провального типа, в которой диаметры отверстий постепенно увеличиваются от центра к периферии с постоянным шагом. Отверстия также расположены по концентрическим окружностям.

Площади свободного сечения решеток составляли 35% и 45%.

<sup>3</sup> Ланкин Р.И., Францкевич В.С. Влияние конструкции опорной решетки на гидродинамику в массообменном аппарате // Химическая технология и техника: Химическая технология и техника: материалы 87-й науч.-техн. конф. професс.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов / Минск (31 янв. – 12 февр. 2023 г.) – Минск: БГТУ, 2023. – С. 85–87



*a* – тип 1; *б* – тип 2; *в* – тип 3

Рисунок 2. – Опорно-распределительные решетки

На первом этапе исследования экспериментальным способом были определены значения гидравлического сопротивления самих решеток, по результатам которых построены графики зависимости гидравлического сопротивления  $\Delta p$ , Па, в колонне от скорости газа  $\omega$ , м/с (рисунок 3).

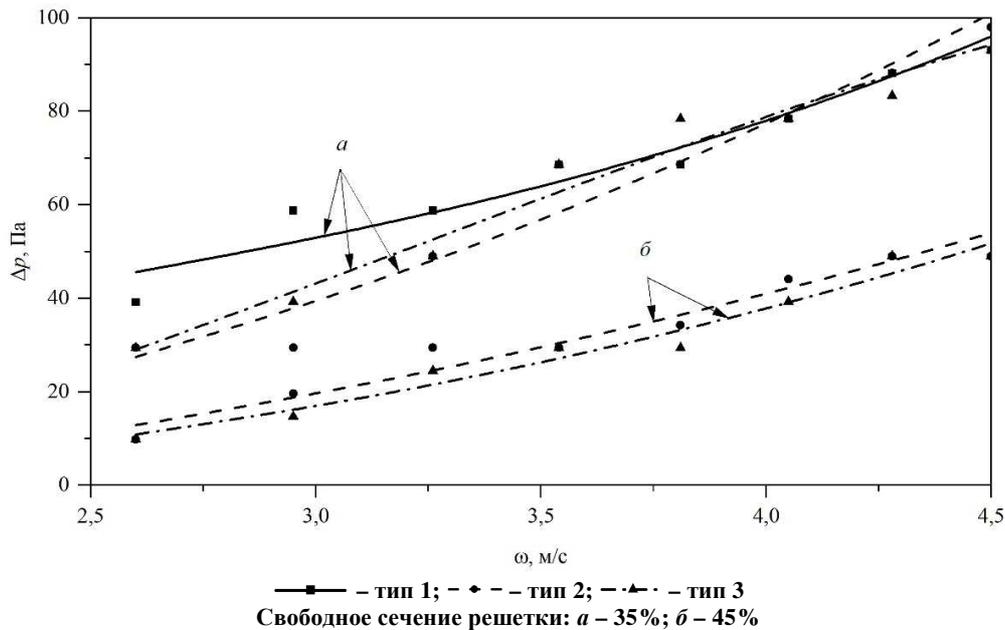


Рисунок 3. – Зависимость гидравлического сопротивления опорно-распределительной решетки от скорости газа

Согласно графику (см. рисунок 3), чем больше площадь свободного сечения решетки, тем меньше гидравлическое сопротивление. При одинаковом свободном сечении гидравлическое сопротивление при различных конструкциях решеток малого диаметра отличается незначительно. При скоростях газа до 3,5 м/с гидравлическое сопротивление меньше с решетками типа 2 и типа 3.

На следующем этапе эксперименты проводились со слоем шаровой насадки. Плотность орошения составляла 0 и 20 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч). По результатам этой части были построены графики зависимости гидравлического сопротивления сухой насадки  $\Delta p$ , Па, в колонне от скорости газа  $\omega$ , м/с (рисунок 4) и графики зависимости гидравлического сопротивления насадки  $\Delta p$ , Па, в колонне от скорости газа  $\omega$ , м/с при плотности орошения  $q = 20$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч) (рисунок 5).

Из графика на рисунке 4 можно отметить, что гидравлическое сопротивление меньше с опорно-распределительной решеткой типа 3 со свободным сечением решетки как 35%, так и 45%. При скорости газа от 2,5 до 4 м/с разница гидравлического сопротивления этой решетки достигает наибольшего значения по сравнению с остальными видами при свободных сечениях решеток. Также следует добавить, что с решеткой типа 3 в процессе эксперимента наглядно было видно, что распределение насадки по сечению в аппарате более равномерно по сравнению с остальными.

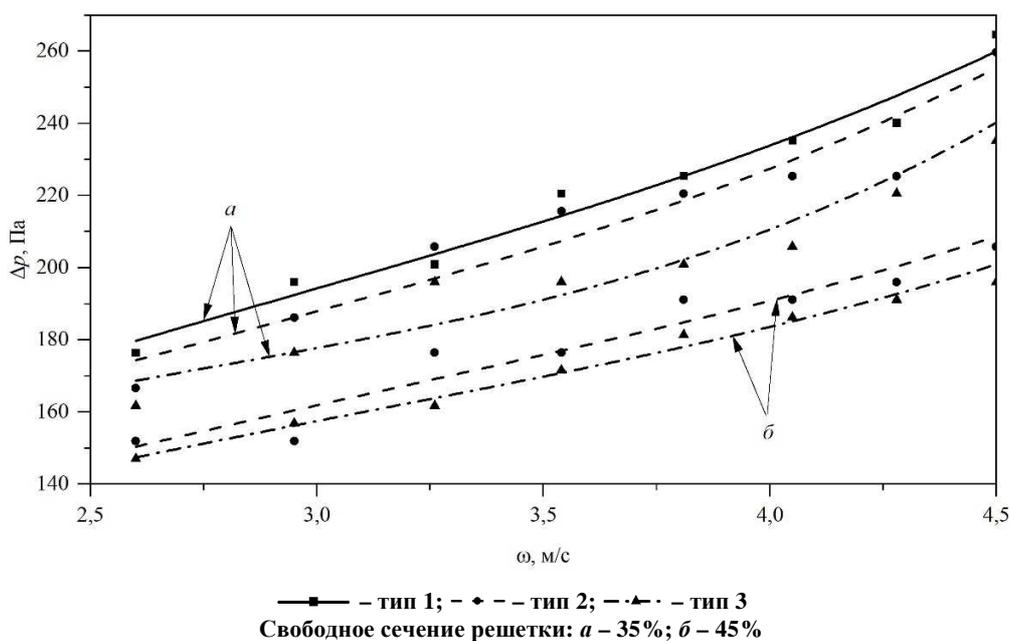


Рисунок 4. – Зависимость гидравлического сопротивления сухой насадки от скорости газа

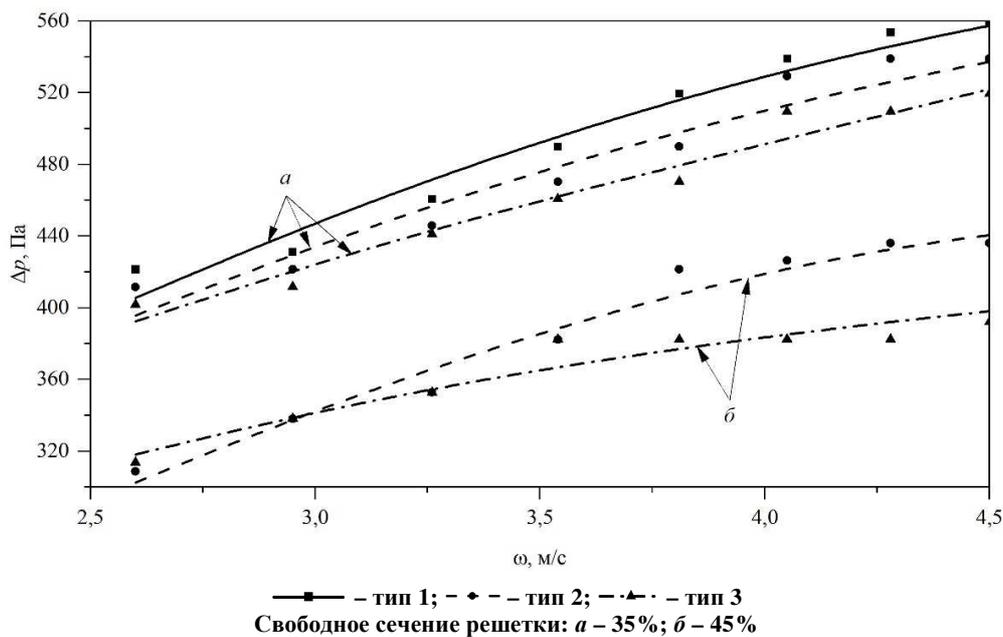


Рисунок 5. – Зависимость гидравлического сопротивления насадки от скорости газа при плотности орошения  $20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

Согласно графику на рисунке 5, при орошении насадок жидкостью наибольшее гидравлическое сопротивление наблюдается при использовании опорно-распределительной решетки типа 1, а наименьшее – типа 3. Необходимо сказать, что при свободном сечении решеток 35% гидравлическое сопротивление с каждым следующим типом решетки незначительно меньше предыдущего. При свободном сечении 45% до скорости газа 3,2 м/с гидравлическое сопротивление насадок с разными типами решеток не отличается. А при увеличении скорости уже замечается значительный рост гидравлического сопротивления с опорно-распределительной решеткой типа 2, относительно типа 3. При скоростях газа свыше 3,8–4 м/с начинается активный брызгоунос.

Одна из предложенных опорно-распределительных решеток прошла промышленные испытания на абсорбционном аппарате в процессе производства кровельных материалов. В результате установлено, что гидравлическое сопротивление опорно-распределительной решетки уменьшилось, а также отмечено более равномерное распределение подвижной шаровой насадки по сечению аппарата во время его работы, которое наблюдалось через смотровое окно.

Использование этой решетки приводит к повышению эффективности массообмена вследствие увеличения турбулизации потока возле стенки аппарата или при той же производительности по газу к снижению удельных энергозатрат на процесс очистки воздуха.

**Заключение.** Проходя через насадку, газовый поток испытывает гидравлическое сопротивление, так что разность давлений газа до и после подвижной насадки равна гидравлическому сопротивлению, которое создается во время прохождения через насыпную насадку. Гидравлическое сопротивление насадки зависит от количества насыпаемой насадки, гидродинамического режима работы, связанного со скоростью газа. Наибольшее влияние на гидравлическое сопротивление оказывают скорость газа и плотность орошения.

Из приведенных графиков (см. рисунки 3–5) следует, что наименьшее гидравлическое сопротивление в насадке было замечено с использованием опорно-распределительной решетки типа 3. Также с этой решеткой было замечено более равномерное распределение подвижной шаровой насадки по сечению аппарата во время работы.

С увеличением скорости потока газа возрастает интенсивность брызгоуноса [7], который наиболее ярко выражался при скоростях газа свыше 3,8–4 м/с.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Заминян А.А., Рамм В.М. Абсорберы с подвижной насадкой. – М.: Химия, 1980. – 184 с.
2. Ланкин Р.И., Францкевич В.С. Гидравлическое сопротивление абсорбера с подвижной шаровой насадкой / Труды БГТУ. Сер. 2, Хим. технологии, биотехнология, геоэкология. – 2022. – № 2(259). – С. 107–114. DOI 10.52065/2520-2669-2022-259-2-107-114
3. Maćkowiak J. Fluid Dynamics of Packed Columns. Principles of the Fluid Dynamic Design of Columns for Gas/Liquid and Liquid/Liquid Systems. – Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. – 355 p.
4. Левш И.П., Убайдуллаев А.К. Тарельчатые абсорберы и скрубберы с псевдооживленным (подвижным) слоем орошаемой насадки. – Ташкент: Узбекистан, 1981. – 236 с.
5. Балабеков О.С., Волненко А.А. Расчет и конструирование тепломассообменных и пылеулавливающих аппаратов с подвижной и регулярной насадкой. – Шимкент: GOLDYES, 2015. – 184 с.
6. Рамм В.М. Абсорбция газов. – 2-е изд., переработ. и доп. – М.: Химия, 1976. – 656 с.
7. Котов В.М., Вальдберг А.Ю., Гельперин Н.И. Аппараты с псевдооживленным слоем орошаемой шаровой насадки и возможности их применения в процессах очистки газов и пылеулавливания. – М.: ЦНИИТЭНефтехим, 1970. – 52 с.

#### REFERENCES

1. Zaminyan, A.A. & Ramm, V.M. (1980). *Absorbbery s podvizhnoi nasadkoi*. Moscow: Khimiya. (In Russ.)
2. Lankin, R.I. & Frantskevich, V.S. (2022). Gidravlichesкое soprotivlenie absorbera s podvizhnoi sharovoi nasadkoi [Hydraulic resistance of the absorber with a movable ball nozzle]. *Trudy BGTU. Seriya 2: Khimicheskie tekhnologii, biotekhnologiya, geoekologiya [Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical technologies, biotechnology, geoeology]*, 2(259), 107–114. DOI 10.52065/2520-2669-2022-259-2-107-114 (In Russ., abstr. in Engl.)
3. Maćkowiak, J. (2010). *Fluid Dynamics of Packed Columns. Principles of the Fluid Dynamic Design of Columns for Gas/Liquid and Liquid/Liquid Systems*. Heidelberg: Springer-Verlag. (In Engl.)
4. Levsh, I.P. & Ubaidullaev, A.K. (1981). *Tarel'chatye absorbbery i skrubbery s psevdoozhivlennym (podvizhnym) sloem oroshaemoi nasadki*. Tashkent: Uzbekistan. (In Russ.)
5. Balabekov, O.S. & Volnenko, A.A. (2015). *Raschet i konstruirovaniye teplomassoobmennykh i pylaulavliyayushchikh apparatov s podvizhnoi i regulyarnoi nasadkoi*. Shimkent: GOLDYES. (In Russ.)
6. Ramm, V.M. (1976). *Absorbtsiya gazov*. Moscow: Khimiya. (In Russ.)
7. Kotov, V.M., Val'dberg, A.Yu. & Gel'perin, N.I. (1970). *Apparaty s psevdoozhivlennym sloem oroshaemoi sharovoi nasadki i vozmozhnosti ikh primeneniya v pro-tsessakh ochistki gazov i pylaulavlivaniya*. Moscow: TsNIITENeftekhim. (In Russ.)

Поступила 17.07.2023

### INFLUENCE OF GEOMETRIC PARAMETERS OF SUPPORT-DISTRIBUTION GRIDES ON HYDRODYNAMICS IN A MASS EXCHANGER WITH A MOVABLE BALL NOZZLE

**R. LANKIN, V. FRANTSKEVICH**  
(Belarussian State Technological University)

*In the chemical industry, as well as in the petrochemical, construction, metallurgical, mining and chemical and other industries, packed and tray columns are used for the mass transfer process. This paper provides a brief introduction to packed columns and their applications. The principle of operation of movable nozzles is outlined, as well as their main disadvantages. An experimental absorption column is described and a technique for conducting experimental studies is described. Based on the results of the experiments, graphs of the dependence of the hydraulic resistance of the support-distribution grids on the gas velocity, as well as movable ball nozzles using these grids, both with and without irrigation, were plotted.*

**Keywords:** absorption, support-distribution grid, movable nozzle, hydraulic resistance.

УДК 656.56:004.9

DOI 10.52928/2070-1616-2023-48-2-113-116

## РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА НЕФТЕПРОДУКТА В МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ С ПЕРЕДАЧЕЙ ДАННЫХ В СИСТЕМЫ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ

канд. техн. наук, доц. Л.М. СПИРИДЁНОК

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Т.С. КАЗМИРКИВСКАЯ

(Приемо-сдаточный пункт НС «Солнечногорская», Володарское РНПУ,  
филиал АО «Транснефть–Верхняя Волга», Россия)

М.А. ПЕТРОЧЕНКО

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Рассматриваются источники возникновения потерь нефтепродукта на магистральных трубопроводах. Показана актуальность данной проблемы. Определены предмет и объект исследования, поставлены задачи для определения факторов, влияющих на возникновения различных видов потерь нефтепродукта при перекачке, определены причины появления аварийных, естественных и эксплуатационных потерь. Представлена система точного определения места утечки, которая позволит обеспечить уменьшение сверхнормативных потерь нефти и нефтепродукта при несанкционированных врезках, а также экологических последствий при разливе продукта в окружающую среду.

**Ключевые слова:** потери нефтепродукта, магистральный нефтепровод, несанкционированные врезки, утечки нефтепродукта, методы обнаружения утечек, мобильный комплекс.

**Введение.** Трубопроводный транспорт является наиболее экономически и экологически выгодным для транспортировки нефти и нефтепродукта на значительные расстояния. Однако при перекачке нефтепродукта возникают различные виды его потерь, такие как эксплуатационные, естественные и аварийные. Эксплуатационные и естественные потери относятся к нормативным, и их величина в настоящее время рассчитывается и учитывается. Однако потери, возникающие при аварийных разливах нефтепродукта, несанкционированных врезках при хищении перекачиваемого нефтепродукта, нельзя считать. Несанкционированные врезки приносят огромные убытки компаниям, они связаны как с потерей нефтепродукта, так и с экологическими последствиями при его разливе в окружающую среду<sup>1</sup> [1].

Официальная статистика ПАО «Транснефть», которая транспортирует 83% всех нефтепродуктов в Российской Федерации, показала, что в период с 2008 по 2018 гг. было зафиксировано более 5000 незаконных врезок в магистральные нефтепроводы. Экономический ущерб от несанкционированных врезок исчисляется сотнями и более тонн в сутки потерянного продукта. Для Республики Беларусь также существует проблема несанкционированных врезок, хотя в последнее время она успешно решается. Одним из решений вопроса обнаружения и ликвидации несанкционированных врезок является проведение мониторинга герметичности линейной части нефте- и нефтепродуктопроводов<sup>2</sup> [2]. Основной проблемой выявления несанкционированных врезок является протяженность линейной части магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов. В Республике Беларусь и особенно Российской Федерации протяженность трубопроводов достигает нескольких тысяч километров, при этом на трубопроводах могут одновременно существовать десятки, а то и сотни несанкционированных врезок. Поэтому важнейшим вопросом при обнаружении утечек из трубопровода является обеспечение точного места выхода нефти или нефтепродукта, что поможет организовать оперативную работу по обнаружению и устранению несанкционированных отборов.

**Основная часть.** Проблема обнаружения и устранения несанкционированных отборов в настоящее время является актуальной для России, Республики Беларусь, а также других стран. Она решается непрерывным мониторингом герметичности магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов (МННПП). Непрерывный мониторинг в пределах технологического участка МННПП в режиме реального времени обеспечивается системами обнаружений утечек (далее – СОУ). Основная функция СОУ – это выявление факта возникновения утечки и установление ее координат и интенсивности. Системы работают по заданным алгоритмам на всех режимах функционирования МННПП, включая нестационарные, переходные режимы и режим остановленной перекач-

<sup>1</sup> Российский статистический ежегодник 2021: статист. сб. / под ред. П.В. Малкова. – М.: Изд-во Федер. службы гос. статистики, 2021. – 692 с.

<sup>2</sup> Мансуров А.С. Способы борьбы с аварийным разливом нефти // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. ст. XLII Междунар. науч.-практ. конф. / г. Пенза (15 февр. 2021 г.). – Пенза: Наука и Просвещение, 2021. – С. 40–42.

ки. Система обеспечивает формирование сигнала тревоги о возможном наличии утечки и отображение информации в реальном масштабе времени, помогающей оперативно принять решение по устранению утечки. В Республике Беларусь, России и в странах Запада (США, Германия, Франция и др.) наличие СОУ на магистральных трубопроводах регулируется на законодательном уровне. В них представлены описание методов обнаружения утечек и требования к следующим видам СОУ:

- определение утечек по волне давления;
- балансовый метод обнаружения утечек;
- комбинированные системы обнаружения утечек.

Методы, применяемые для обнаружения утечек на МННПП основываются на различных принципах измерения давления и расхода потока. Каждый из этих методов имеет преимущества и недостатки.

Метод определения утечек по изменению волны давления основан на сопоставлении данных расчетного профиля наблюдаемого давления во всех точках трубопровода. При возникновении утечки или несанкционированной врезки появляется излом в профиле давления. Алгоритм определения утечек по волне давления основан на регистрации фронта волны изменения давления, которая возникает в месте утечки из трубопровода. Место возникновения утечки вычисляются по разнице времени прихода фронта волны в конечные сечения исследуемого участка МННПП.

Балансовый метод включает определение расходов в начальном и конечном сечении контролируемого участка трубопровода, что позволяет учитывать количество продукта в самой трубе.

К комбинированным методам СОУ относятся:

- метод «давление–расход» основан на применении математической модели расчета давления и расхода в системе, который определяет факт утечки и ее координаты. Для обеспечения корректных граничных условий необходимо измерять расход и давление на концах контролируемого СОУ участка. Все измерения должны сопровождаться метками времени;

- метод диагностики утечек на основе анализа давлений в изолированных секциях при закрытых задвижках. Метод основан на анализе изменений давления в секциях за определенный период и позволяет определять утечки, имеющие малые величины. При использовании данного метода необходимо, чтобы были открыты линейные задвижки, т.е. трубопровод был разделен на несколько участков.

Все вышеперечисленные методы требуют использования стационарной установки оборудования. Кроме того, перечисленные методы не позволяют обеспечить точные координаты утечки продукта в трубопроводе. Для более точного определения места утечки специалистами ПАО «Транснефть», бывшими выпускниками Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой, была предложена разработка мобильного комплекса измерения расхода в МННПП с передачей данных в системы диспетчеризации для локализации участков МННПП. Главным условием работы мобильного комплекса является его передвижение между уже существующими, врезными расходомерами, показывающими разницу в расходе. Мобильный комплекс представляет собой передвижную базу, состоящую из спецавтомобиля, оснащенного расходомерами. Основным требованием к выбору спецавтомобиля является его высокая проходимость и возможность работы в экстремальных условиях. Например, специалистами ПАО «Транснефть» предлагается использовать спецавтомобиль АРОК на базе КАМАЗ 43118 (рисунок 1). Для Республики Беларусь как базовый можно использовать отечественный автомобиль МАЗ с установкой на нем необходимого для работы оборудования.



Рисунок 1. – Спецавтомобиль АРОК  
на базе КАМАЗ 43118

В автомобиле должны быть предусмотрены пассажирский и технологический отсеки. В технологическом отсеке располагается все необходимое оборудование, в пассажирском – блоки принятия пищи, отдыха и ночлега для случаев длительных командировок.

Для измерения расхода можно использовать накладные ультразвуковые расходомеры. Данные расходомеры имеют ряд преимуществ, к которым можно отнести возможность в короткое время организовать точку измерения расхода на новых и существующих объектах. Монтаж накладных датчиков осуществляется без врезки в трубопровод, что, следовательно, позволяет уменьшить затраты на установку расходомера. Например, специалистами ПАО «Транснефть» предлагается использовать расходомеры Стримлюкс (рисунок 2).



**а – расходомер отдельно от тела трубы; б – расходомер на теле трубы; в – расходомер модульного типа**

**Рисунок 2. – Расходомеры Стримлюкс**

Устанавливать расходомеры Стримлюкс можно несколькими способами:

- устанавливать расходомер отдельно от тела трубы (см. рисунок 2, а);
- устанавливать расходомер на тело трубы (см. рисунок 2, б);
- устанавливать расходомер отдельно от трубы в виде модуля (см. рисунок 2, в).

При любом из перечисленных способов расходомер использует два накладных ультразвуковых датчика, которые работают одновременно как ультразвуковой передатчик и ультразвуковой приемник. Накладные ультразвуковые датчики крепятся к трубопроводу снаружи на определенном расстоянии друг от друга. Ультразвуковые датчики могут быть установлены следующими способами:

- V-образно, когда ультразвук пересекает трубу дважды;
- W-образно (используется редко), когда ультразвук пересекает трубу четыре раза;
- Z-образно, когда накладные ультразвуковые датчики монтируются на противоположных сторонах трубы и ультразвук пересекает трубопровод один раз.

Выбор способа монтажа зависит от трубопровода и характеристик жидкости. Расходомер работает по принципу поочередной передачи и приема частотно-модулированного всплеска звуковой энергии между двумя ультразвуковыми датчиками и измерения времени, за которое звуковой сигнал проходит между ними. Разница в измеренном времени прохождения сигнала прямо и точно определяет скорость жидкости в трубопроводе.

Расходомер включает в себя стандартный интерфейс связи RS-485 и необходимый протокол передачи данных. Его аппаратные средства поддерживают модем для передачи данных по сети на базе телефонной линии. С помощью преобразователя RS232/RS485 расходомер может быть подключен к сетевой шине RS485. Можно также использовать модуль кратких сообщений GSM для передачи данных расхода жидкости на удаленный компьютер. С помощью модуля GSM можно проверять данные расхода жидкости и статус расходомера с сотового телефона.

При работе данной системы можно использовать накладной расходомер, датчики которого устанавливаются на тело трубы. В этом случае управление расходомером может совершаться с удаленного компьютера. Протокол передачи данных основан на принципе ведущий/ведомый. Ведущий (удаленный компьютер) отправляет команду, ведомый (расходомер) реагирует на нее.

При установке датчиков расходомера на тело трубы необходимо произвести земляные работы по вскрытию участка трубопровода. Для производства земляных работ, на спецавтомобиль предлагается оснастить мини-экскаватором на прицепе. В настоящее время спецавтомобили комплектуются с гидравлическими манипуляторами. Недостатком этой комплектации является работа навесного оборудования от вала отбора мощности или штатной гидравлики. Использование мини-экскаватора на прицепе позволит производить земляные работы вне зависимости от спецавтомобиля, но в его составе, при передвижении к контрольному участку трубопровода. Например, специалистами ПАО «Транснефть» предлагается использовать мини-экскаватор на прицепе Landformer 150D. Внедрение предлагаемой разработки позволит преобразовать спецавтомобиль в мобильный комплекс измерения расхода в МННПП. Данное предложение специалистов ПАО «Транснефть» можно использовать на МННПП Республики Беларусь.

**Заключение.** Мобильный комплекс, предложенный специалистами ПАО «Транснефть», для измерения расхода в МННПП с передачей данных в системы диспетчеризации позволит:

- проводить непрерывный мониторинг герметичности МННПП;
- оперативно обнаруживать утечки нефти и нефтепродукта для локализации участков МННПП;
- более точно определять координаты возникших утечек продукта и их интенсивность.

Применение мобильного комплекса для мониторинга и обнаружения утечек на МННПП позволит обеспечить уменьшение сверхнормативных потерь нефти и нефтепродукта при несанкционированных врезках, что даст минимизировать экономический ущерб трубопроводным организациям при транспортировке нефти и нефтепродукта. Кроме этого, оперативная реакция обслуживающей организации на потери продукта обеспечит уменьшение экологических последствий при его разливе в окружающую среду.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Болотов Г.Б. Примеры и некоторые статистические данные о разливах нефти и нефтепродуктов // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. – 2021. – № 4(41). – С. 123–128.
2. Плюхина Е.Е. Метод обнаружения несанкционированных врезок на трубопроводах // Вестн. Оренбург. гос. ун-та. – 2011. – № 16(135). – С. 92–95.

#### REFERENCES

1. Bolotov, G.B. (2021). Primery i nekotorye statisticheskie dannye o razlivakh nefti i nefteproduktov. *Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala*, 4(41), 123–128. (In Russ., abstr. in Engl.)
2. Plyukhina, E.E. (2011). Metod obnaruzheniya nesanktsionirovannykh vrezok na truboprovodakh. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 16(135), 92–95. (In Russ., abstr. in Engl.)

Поступила 01.09.2023

### DEVELOPMENT OF A MOBILE COMPLEX FOR MEASURING THE CONSUMPTION OF PETROLEUM PRODUCTS IN MAIN PIPELINES WITH DATA TRANSFER TO DISPATCHING SYSTEMS

**L. SPIRIDENOK**

*(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)*

**T. KAZMIRKIVSKAYA**

*(Acceptance and delivery point of the Solnechnogorskaya NS, Volodarsky RNPU, branch of Transneft-Upper Volga JSC, Russia)*

**M. PETROCHENKO**

*(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)*

*The article deals with the problem of the occurrence of losses of petroleum products on the main pipelines. The purpose of the study is revealed. The authors defined the subject and object of the study, set tasks to determine the factors influencing the occurrence of various types of losses of petroleum products during pumping, and also determined the causes of emergency, natural and operational losses. The article considers a system for accurately determining the location of the leak, which will ensure the reduction of excess losses of oil and petroleum products during unauthorized tie-ins, as well as environmental consequences when the product is spilled into the environment.*

**Keywords:** oil product losses, main oil pipeline, unauthorized tie-ins, oil product leaks, leak detection methods, mobile complex.

## НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

УДК 378.2

DOI 10.52928/2070-1616-2023-48-2-117-119

## ИЗЛОЖЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ, ВЫНОСИМЫХ НА ЗАЩИТУ, В ДИССЕРТАЦИИ

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

*Приведены определения и объемы понятий объекта, предмета и цели исследования со связями между ними. Установлена важность точного и объективного описания положений диссертации, выносимых на защиту. Отдельные положения, выносимые на защиту, рекомендуется описывать по определенному алгоритму с указанием его названия, содержания, отличий (составляющих научную новизну) и вклада соискателя в теорию и практику без использования других сведений. Сделано предположение об оценке объема научной новизны в результатах диссертации.*

**Ключевые слова:** диссертация, объект исследования, предмет исследования, цель исследования, положение, выносимое на защиту.

**Введение.** Изучение авторефератов диссертаций, представленных на защиту и выставленных для ознакомления на сайте ВАК, показывает, что в ряде случаев положения, выносимые на защиту и представленные в общей характеристике работы, содержат только названия положений, изложены нечетко и невыразительно. Это вызывает у членов научных собраний и советов при экспертизе диссертации сомнения в значимости работы и ряд соответствующих вопросов.

**Цель работы** – способствование изложению в общей характеристике работы диссертации положений, выносимых на защиту, таким образом, чтобы они полно и объективно характеризовали материал диссертации и не вызвали вопросов на различных стадиях ее экспертизы.

**Основная часть.** Положительная оценка защищаемой диссертации предполагает наличие ряда условий, каждое из которых необходимо, а все вместе они достаточны для такой оценки<sup>1</sup> [1]. Ряд таких условий (самостоятельность выполнения, квалификационный характер, внутреннее единство, свидетельствование личного вклада автора в науку, решение научной задачи) включено в определение диссертации<sup>2</sup>. Но имеется еще одно условие – отсутствие критической массы замечаний по изложению ее структурных элементов, основными из которых являются объект, предмет и цель исследования, а также новизна результатов, составляющих положения, выносимые на защиту. Уточним определения этих терминов.

Объект исследования – часть изменяющегося и развивающегося материального мира (в виде устройств, процессов, материалов и др.), которая познается и совершенствуется исследователем. Другими словами, объект исследования – часть объективной реальности до поры непонятной и непригодной для эффективного использования, на что направлена познавательная деятельность исследователя с целью совершенствования этого объекта. Объект исследования характеризуется существенной научной и прикладной значимостью в рассматриваемой предметной области. Объем объекта исследования – целое или часть (например, автомобиль или его агрегат, станок или устройство для установки инструмента). Масштаб использования объекта исследования распространяется на отдельные предприятия (организации), группы предприятий, отрасль производства, страну, мировое сообщество.

Предмет исследования в диссертации – носитель научного знания, которым могут быть: теории, законы, принципы, закономерности, зависимости, концепции, идеи, экспериментальные методики, методики, вносящие вклад в расширение представлений об изучаемом явлении и расширяющие границы применимости полученных результатов, гипотезы, связи данного явления с другими, генезис процесса, алгоритмы, пределы и перспективы практического использования теории на практике, технологические процессы, новые материалы, модели эффективного применения знаний, системы практических рекомендаций, методические рекомендации, и др. Чем ближе к началу перечисления находится носитель научного знания, тем он большим значим. Предмет исследования – свойства, связи и отношения объектов, исследуемые с определенной целью.

Цель исследования – основной желаемый конечный результат работы при совершенствовании объекта исследования, идеальный образ будущего, на достижение которого направлено действие исследователя. Цель выражается более высоким результатом в обслуживаемом наукой производстве в виде освоения продукции новых видов, повышения технического уровня и качества продукции или услуг, повышения производительности труда и обеспечения его безопасности, исключения аварий, защиты окружающей среды от производственной

<sup>1</sup> Лапука О.Г., Малкин В.А. О конкретизации требований к формализованным подразделам диссертаций по техническим наукам // Советы по защите диссертаций в системе аттестации кадров высшей научной квалификации: материалы науч.-практ. конф. / Минск (29 нояб. 2018 г. – Минск, 2019. – С. 42–44.

<sup>2</sup> Положение о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий: в ред. Указа Президента Республики Беларусь от 02.06.2022 № 190. – Минск: Высш. аттестац. комиссия Респ. Беларусь, 2022. – 21 с.

деятельности человека, снижения расхода производственных ресурсов и т.д. Хорошая работа преследует знаковую цель, которая определяется размерами объекта исследования, предполагаемой степенью его совершенства и масштабами использования.

В формулировках объекта исследования и цели работы ее научная окраска не просматривается. Однако цель пронизывает всю работу, придает ей лаконичность, системность, стройность и упорядоченность, дисциплинирует автора, не позволяет ему отклоняться в сторону. Цель технической работы выражают количественным показателем. В заключении работы сопоставляют значения этого показателя – каким оно было до выполнения работы и каким оно стало в результате ее выполнения.

Положения, выносимые на защиту, – основные структурные элементы диссертации, приведенные в общей характеристике работы. Это четкие формулировки научно значимых и обоснованных результатов исследования, определяющих вклад соискателя в теорию и практику. В основу этого определения положено толкование В.И. Даля, сделанное им еще в XIX в.: «Диссертация – небольшое ученое сочинение с целью доказать одно или несколько научных положений». Положения констатируют новые свойства предмета исследования и указывают возможные пути и способы их использования в деле совершенствования объекта исследования. Соискатель раскрывает и отстаивает научные положения диссертации во время ее публичной защиты перед членами совета и другими присутствующими.

Описание положения не представляют в виде общих невыразительных конструкций типа «результаты анализа...», «результаты теоретических и экспериментальных исследований...» и др. Формулировку каждого отдельного положения рекомендуется строить в виде одного четырехзвенного предложения [2] (подобно описанию формулы изобретения), включающего следующие компоненты (таблица):

1. Название положения, относящееся к предмету и (или) объекту исследования. Качественная составляющая научной новизны работы определяется ее наличием в названиях научных положений.

2. Содержание положения в виде целостного множества его частей.

3. Признаки научной новизны, влияющие на совершенствование объекта исследования и определяющие отличия данного положения от известных научных результатов. Как положения, выносимые на защиту, являются основной структурной составляющей общей характеристики работы, так и содержание этого пункта положения является его основной составляющей. Количественная составляющая научной новизны определяется сопоставлением содержания научной новизны, приведенной в составе этих положений с содержанием ранее опубликованного материала по данному научному направлению.

4. Значимый научный, практический, социальный или экономический результат, достигаемый за счет использования отличительных признаков положения, перечисленных в п. 3, и обеспечивающий частично или полностью достижение поставленной цели, выраженный в качественном, а лучше, в количественном виде. Количественные выражения результатов работы углубляют описание положений.

Таблица. – Структура положения, выносимого на защиту

| Компоненты положения                                                                | Содержание компонентов                                                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Название                                                                         | Наименование нового научного знания, заключенного в понятие положения (теория, закон, принцип, закономерность, зависимость, особенность, процесс и др.) и (или) усовершенствованного объекта исследования |
| 2. Содержание, начинающееся словом «включающий (-ая, -ее)»                          | Перечисление (описание) составных частей положения, относящихся к объекту и предмету исследования                                                                                                         |
| 3. Отличия, начинающиеся словом «отличающийся (-аяся, -еся)»                        | Раскрытие сути нового научного знания (научной новизны), заключенного в предмете исследования, и влияния этого знания на совершенствование объекта исследования                                           |
| 4. Вклад в теорию и практику, начинающийся как «что дает», «что обеспечивает» и др. | Раскрытие в количественном виде значения положения для теории и практики, касающегося достижения цели исследования за счет использования новых знаний и совершенствования объекта исследования            |

При экспертизе диссертации возникает вопрос «Хватает ли объема научной новизны для положительной оценки диссертации?». Выявить факт наличия научной новизны в диссертации (приращения научных знаний) с характеристикой ее степени отличия от результатов, полученных ранее (что установлено впервые, а что получило развитие), можно лишь сопоставлением материала диссертации с материалами опубликованных работ. Все же объем научной новизны, необходимый для положительной оценки самой диссертации, определить затруднительно. Такая оценка, на наш взгляд, может быть лишь качественной с учетом сопоставления описания научной новизны со значимостью достигнутой цели исследования, объемами и масштабами использования усовершенствованного объекта исследования.

Таким образом, описание научных положений, выносимых на защиту, базируется на всесторонней характеристике результатов, относящихся только к объекту и предмету исследования, с явно просматриваемой связью между этими результатами и целью работы. Положения приводят без авторской интерпретации, что дает возможность другим ученым самим оценить качество положений.

Описание других объектов, процессов и их свойств в положениях, тем более, при отсутствии указанных результатов, равно как и критика чужих результатов, являются неуместным. В ряде диссертаций в состав положений, выносимых на защиту, соискатели включают различные модели объектов исследования или их частей

или соответствующие методики, с помощью которых получены сведения о поведении реальных объектов. У читателя формируется мнение, что автору работы нечего сказать о ее результатах. Думается, такие модели или методики не являются ни объектом, ни предметом исследования. Они служат только инструментом ученого для добывания новых знаний об объекте исследования, когда натурный эксперимент невозможен или трудоемок, поэтому сведения о них не могут быть отдельными положениями. Сведения модельных экспериментов с помощью установленных механизмов подобия должны характеризовать поведение объекта исследования, познаваемого и улучшаемого соискателем.

Количество положений и объем каждого без пропусков и повторов выбирают из расчета – раскрыть научную и практическую составляющие диссертации. Сначала идут положения с научными результатами. Последнее положение, имеющее практическую направленность, содержит описание признаков усовершенствованного объекта исследования, обеспечивающих достижение поставленной цели. Сумма сведений о цели исследования по всем положениям дает ее общий объем.

При таком описании положений, выносимых на защиту, раздел «Научная новизна» общей характеристики работы дублирует содержание части положений, выносимых на защиту. При соответствующей корректировке нормативного документа ВАК отдельное описание научной новизны можно исключить, т.к. описание частей научной новизны с необходимой полнотой и в связях с другими структурными элементами излагают в качестве третьего компонента каждого положения.

Следует обращать внимание на соответствие содержания объемов понятий, заключенных в отдельных положениях и материале диссертации. Несоответствие этих объемов – это или научный подлог (обман читателя), или неряшливость автора. В первом случае содержание положения по объему понятия шире объема понятия материала самой диссертации (автор приводит характеристику отсутствующего материала). Во втором – положение по смыслу уже материала диссертации, при этом возможна потеря того, что автор считает важным.

Содержание отдельных положений, выносимых на защиту, должно быть отражено соискателем до предварительной экспертизы диссертации в научных монографиях и статьях в изданиях, включенных в перечень ВАК Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по соответствующей специальности.

**Заключение.** Уточнены определения и объемы понятий объекта, предмета и цели исследования и связей между ними. Обоснованы содержание и структура описания отдельных положений, выносимых на защиту, включающие: название, содержание, отличия и вклад соискателя в теорию и практику. Сделано предположение об оценке объема научной новизны, содержащихся в результатах диссертации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Головнич А.К. Системный анализ характеризующих признаков диссертационной работы // Вестн. Белорус. гос. ун-та транспорта. Серия: Наука и транспорт. – 2021. – № 1(42). – С. 107–113.
2. Иванов В.П. Структурные элементы диссертации (содержание, последовательность изложения, связи и отношения) // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2023. – № 1(47). – С. 113–117.

#### REFERENCES

1. Golovnich, A.K. (2021). Sistemnyi analiz kharakterizuyushchikh priznakov dissertatsionnoi raboty [System analysis of the characterizing features of the dissertation work]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta. Seriya: Nauka i transport [Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport]*, 1(42), 107–113. (In Russ., abstr. in Engl.)
2. Ivanov, V.P. (2023). Strukturnye elementy dissertatsii (soderzhanie, posledovatel'nost' izlozheniya, svyazi i otnosheniya) [Structural elements of the dissertation (content, sequence of presentation, connections and relationships)]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnyenauki [Bulletin of the Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Sciences]*, 1(47), 113–117. DOI: 10.52928/2070-1616-2023-47-1-113-117 (In Russ., abstr. in Engl.)

Поступила 04.08.2023

#### PRESENTATION IN THE OF PROVISIONS MADE ON DEFENSE

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

*The definitions and volumes of the concepts of the object, subject and purpose of the study and the links between them are given. The importance of an accurate and objective description of the dissertation provisions submitted for defense has been established. Individual provisions submitted for defense are recommended to be described according to a certain algorithm, indicating its name, content, differences (constituting scientific novelty) and the applicant's contribution to theory and practice without using others information. An assumption is made about the assessment of the amount of scientific novelty contained in the results of the dissertation.*

**Keywords:** *dissertation; object of study; subject of study; purpose of the study; defense position.*

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

|                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Голембиевский А.И.</i> Современная парадигма познания металлорежущих станков .....                                                                        | 2  |
| <i>Радионов А.В., Закревская Н.В., Пилипенко С.В., Штемпель О.П.</i> Отжиг холоднокатанных полос в атмосфере защитных газов .....                            | 13 |
| <i>Мойсейчик Е.А., Мойсейчик А.Е., Яковлев А.А.</i> Выявление опасных состояний и контроль разрушения в стальных растянутых элементах тепловым методом ..... | 22 |

### ТРАНСПОРТ

|                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Капский Д.В., Касьяник В.В., Баханович А.Г., Кухаренок Г.М.</i> Математическое моделирование транспортных корреспонденций и потоков .....                                               | 30 |
| <i>Капский Д.В., Баханович А.Г., Кухаренок Г.М.</i> Совершенствование организации аудита дорожного движения .....                                                                          | 36 |
| <i>Аземшиа С.А., Янкович С.Ю., Петров А.И.</i> Оценка потенциала повышения окупаемости работы городского пассажирского транспорта ежедневным прогнозированием пассажиронапряженности ..... | 41 |
| <i>Гурский А.С., Савич Е.Л.</i> Параметры компонентов высоковольтной сети электромобилей и их расчет .....                                                                                 | 50 |
| <i>Потапов В.А., Санько А.А.</i> Повышение качества диагностирования осевого компрессора вертолетного газотурбинного двигателя .....                                                       | 60 |

### ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

|                                                                                                                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Струцкий Н.В., Морозов С.И., Голубева О.В., Бословяк С.В., Янушонок А.Н.</i> Принципы построения, возможности и опыт апробации программного модуля «Гидравлический (поверочный) расчет газопроводов» ..... | 66  |
| <i>Зильберглейт М.А., Марченко И.В.</i> Определение равномерности просвета бумаг различных классов .....                                                                                                      | 70  |
| <i>Булавка Ю.А., Гришанин К.А., Слепенков В.С.</i> Модифицирование битумных вяжущих отходами нефтехимии .....                                                                                                 | 75  |
| <i>Якубовский С.Ф., Булавка Ю.А., Бакатович А.А., Ермак А.А., Азаренко Д.Н.</i> Получение на основе отходов производства синтетических волокон модифицирующей добавки для строительных смесей .....           | 80  |
| <i>Бословяк С.В., Кульбей А.Г., Якубенко А.И., Янушонок А.Н.</i> Разработка методики потерь нефти и нефтепродуктов магистральным трубопроводным транспортом .....                                             | 86  |
| <i>Гундилович Н.И., Попов Р.Ю., Дятлова Е.М., Бука А.В., Мариненко А.Н.</i> Исследование процесса фазообразования при синтезе керамических материалов на основе модифицированного манганита иттрия .....      | 94  |
| <i>Юхно Д.С., Ермак А.А., Емельянова В.А.</i> Изменение характеристик поверхности и распределения пор по размерам нефтяного кокса при его прокатке в присутствии гидроксида калия .....                       | 101 |
| <i>Ланкин Р.И., Францкевич В.С.</i> Влияние геометрических параметров опорно-распределительных решеток на гидродинамику в массообменном аппарате с подвижной шаровой насадкой .....                           | 108 |
| <i>Спиридёнок Л.М., Казмирковская Т.С., Петроченко М.А.</i> Разработка мобильного комплекса измерения расхода нефтепродукта в магистральных трубопроводах с передачей данных в системы диспетчеризации .....  | 113 |

### НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Иванов В.П.</i> Изложение положений, выносимых на защиту в диссертации ..... | 117 |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|