

MIESIĘCZNIK
POŁOCKI.

Tom I.
Rok 1818.

*«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
Серія В. Прамысловасць. Прыкладныя навукі

У серыі В навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзаваўне, 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, 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 17.02.2022. Бумага офсетная 80 г/м². Формат 60×84^{1/8}. Цифровая печать.
Усл. печ. л. 16,28. Уч.-изд. л. 19,62. Тираж 100 экз. Заказ 83.

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.833

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМАЛЬНЫХ СИЛ В ЗАЦЕПЛЕНИИ ЭКСЦЕНТРИКОВОЙ ПЕРЕДАЧИ ПРИ ПОСТУПАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ САТЕЛЛИТНОГО КОЛЕСА

д-р техн. наук, проф. П.Н. ГРОМЫКО, канд. техн. наук, доц. Д.Ю. МАКАЦАРИЯ
(Могилевский институт Министерства внутренних дел Республики Беларусь)

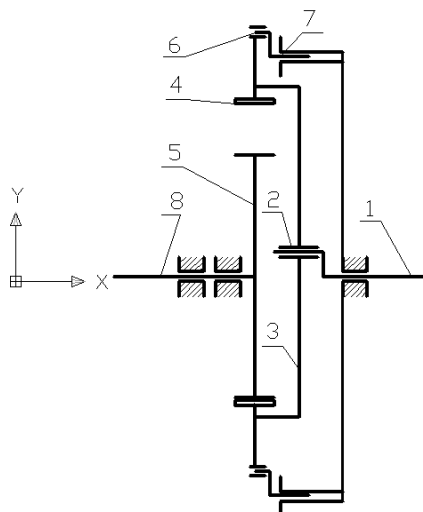
(Белорусско-Российский университет, Могилев),
канд. техн. наук, доц. С.Н. ХАТЕТОВСКИЙ
(Белорусско-Российский университет, Могилев)

Приведены формулы для расчета нормальных сил в зацеплении и дополнительном эксцентрик при поступательном движении сателлитного колеса. Отмечено, что значение нормальной силы в зацеплении при аналитических расчетах является основой для определения ее значимых геометрических параметров. На основе проведенных компьютерных исследований показано, что число передающих движение дополнительных эксцентриков должно быть не менее четырех и будет определяться как из условий контактной прочности контактирующих звеньев, так и геометрическими параметрами передачи. Исследованы компьютерные модели эксцентриковой передачи при поступательном движении сателлитного колеса. Получены эксплуатационные показатели эксцентриковой передачи, на основе которых определено достаточное количество дополнительных эксцентриков. На основе аналитических и компьютерных исследований предложены формулы для расчета значений нормальных сил в зацеплении и дополнительном эксцентрик при поступательном движении. Данные формулы могут быть использованы для создания приводных механизмов, обладающих не только минимальными габаритными размерами, но и различными эксплуатационными показателями, такими как КПД и кинематическая точность выходного вала.

Ключевые слова: дополнительный эксцентрик, круговая траектория, нормальная сила в передаче эксцентрикового типа, поступательное движение сателлита, эксцентриковая передача.

Введение. Одним из наиболее перспективных видов механических передач являются эксцентриковые передачи. Они соосны, обеспечивают редуцирование в широком диапазоне передаточных отношений, технологичны в изготовлении [1; 2]. Особое место в передачах эксцентрикового типа занимает разновидность передач с поступательным движением сателлитного колеса, на основе которой возможно создание механизмов, обладающих минимальными габаритными размерами и сочетанием необходимых эксплуатационных показателей различного рода [3; 4]. При расчете сил эксцентриковой передачи одним из важных критериев является определение значений нормальных сил в зацеплении как самой эксцентриковой передачи, так и звеньев, передающих движение к приводному валу.

На рисунке 1 показана кинематическая структурная схема эксцентриковой передачи, реализующей поступательное движение сателлитного колеса.



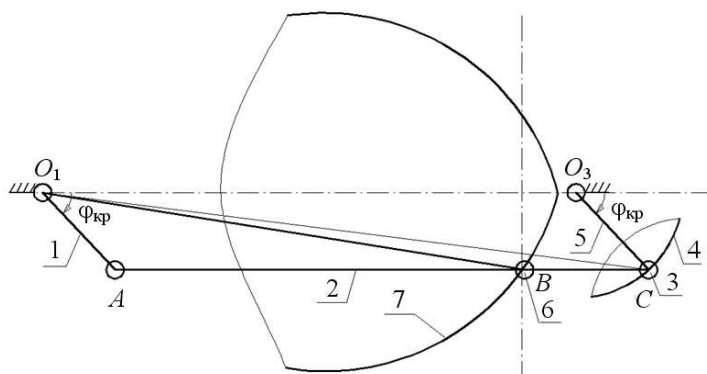
- 1 – входной вал; 2 – эксцентриковый кривошип; 3 – сателлитное колесо;
4 – внутренний зубчатый венец; 5 – центральное наружное колесо;
6 – дополнительный эксцентрик; 7 – дополнительный вал;
8 – выходной вал

Рисунок 1. – Эксцентриковая передача с поступательным движением сателлитного колеса

Работа эксцентриковой передачи с поступательным движением сателлитного колеса (см. рисунок 1) заключается в следующем. Вращение от входного вала 1 передается на эксцентриковый кривошип 2, который за счет вращательной пары между дополнительными валами 7 и дополнительными эксцентриками 6 приводит сателлитное колесо 3 в поступательное движение. Внутренний зубчатый венец 4 взаимодействует с центральным наружным колесом 5, приводя его во вращательное движение, которое передается на выходной вал 8.

Основная особенность поступательного движения сателлитного колеса 3 – его точки движутся по круговым траекториям с радиусами, определяемыми эксцентриситетом. В связи с этим появляется возможность размещать дополнительные эксцентрики 6 с дополнительными валами 7 на любом расстоянии от оси вращения сателлитного колеса. Поэтому важно получить зависимости для расчета нормальных сил в зацеплении и дополнительном эксцентрик, позволяющие определить число указанных дополнительных эксцентриков 6 и дополнительных валов 7, а также их диаметры и расположение относительно оси сателлитного колеса 3 и входного вала 1.

Основная часть. Определение нормальных сил в эксцентриковой передаче с поступательным движением сателлитного колеса. Для определения сил в эксцентриковой передаче с поступательным движением сателлитного колеса была разработана схема, показанная на рисунке 2. При вращательном движении вокруг оси O_1 входной кривошип 1 в виде звена O_1A заставляет сателлитное колесо 2, показанное на схеме в виде звена AB , совершать поступательное движение благодаря закрепленному шарниру A и шарниру 3. Учитывая, что эксцентриситеты входного звена 1 и дополнительного кривошипа 5 одинаковы, точки сателлитного колеса 2 совершают круговое движение. На сателлитном колесе 2 имеется внутреннее зубчатое колесо 7. Условная точка B контакта 6 сателлитного колеса 2 взаимодействует с наружным зубчатым профилем центрального колеса 7, ось вращения которого расположена на неподвижной оси O_1 . В результате указанного взаимодействия центральное колесо 7 совершает вращение вокруг оси O_1 .



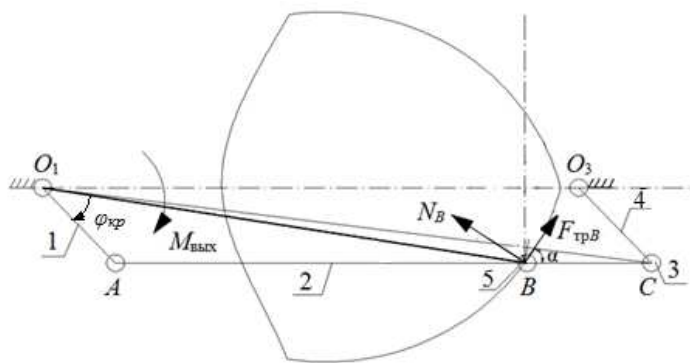
1 – входной кривошип; 2 – сателлитное колесо; 3 – шарнир C ; 4 – отверстие неподвижного диска;
5 – дополнительный кривошип; 6 – условная точка контакта зубьев сателлитного колеса;
7 – условный профиль зуба центрального колеса

Рисунок 2. – Схема для расчета геометрических параметров звеньев в эксцентриковой передаче с поступательным движением сателлитного колеса

Для определения нормальной составляющей в точке контакта 6 проведем силовой анализ зацепления профиля зуба центрального колеса 7 и сателлитного колеса 2 в точке 6 [3]. На рисунке 3 изображена схема центрального колеса O_1B , на основе которой рассчитана сумма моментов сил M_{O_1} и получено значение нормальной составляющей N_B :

$$N_B = \frac{M_{\text{вых}}}{\sqrt{e^2 + r_B^2 + 2 \cdot e \cdot r_B \cdot \cos\left(\varphi_{\text{кр}} + \frac{\varphi_{\text{кр}}}{z}\right)} \cdot \left(f_{\text{тр}B} \cdot \sin\left(\alpha + \arcsin \frac{e \cdot \sin \varphi_{\text{кр}}}{r_B}\right) + \cos\left(\alpha + \arcsin \frac{e \cdot \sin \varphi_{\text{кр}}}{r_B}\right) \right)}, \quad (1)$$

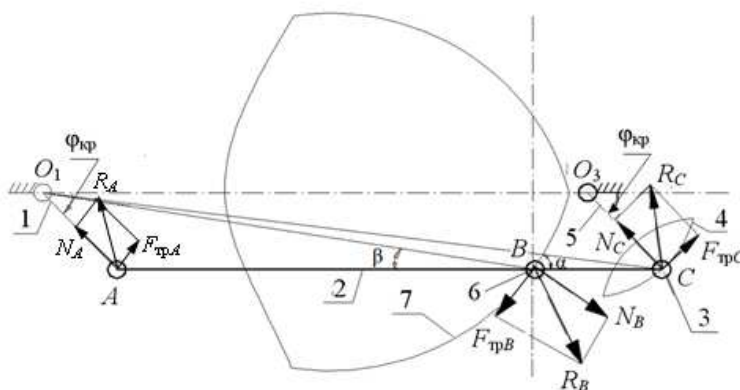
где $M_{\text{вых}}$ – выходной момент;
 N_B – нормальная составляющая реакции в точке B ;
 $f_{\text{тр}B}$ – коэффициент трения в точке B ;
 $F_{\text{тр}B}$ – сила трения в точке B ;
 α – угол наклона $F_{\text{тр}B}$ относительно горизонтали [4];
 e – эксцентриситет, равный длине O_1A ;
 r_B – расстояние, определяющее длину AB ;
 z – число зубьев сателлитного колеса;
 $\varphi_{\text{кр}}$ – угол поворота кривошипа O_1A .



1 – входной кривошип; 2 – сателлитное колесо; 3 – геометрическая ось вала-оси;
4 – дополнительный кривошип; 5 – условная точка контакта зубьев сателлитного колеса

Рисунок 3. – Схема центрального колеса O_1B для определения нормальных сил в передаче эксцентрикового типа

Для определения нормальной составляющей силы N_C была составлена схема сателлитного колеса AC (рисунок 4).



1 – входной кривошип; 2 – сателлитное колесо; 3 – шарнир C; 4 – отверстие неподвижного диска;
5 – дополнительный кривошип; 6 – условная точка контакта зубьев сателлитного колеса;
7 – условный профиль зуба центрального колеса

Рисунок 4. – Схема сателлитного колеса AC , необходимая для определения нормальной силы в передаче эксцентрикового типа

На основе уравнения моментов сил относительно точки A было получено уравнение нормальной силы N_C :

$$N_C = \frac{M_{\text{вых}} \cdot r_B}{\sqrt{e^2 + r_B^2 + 2 \cdot e \cdot r_B \cdot \cos\left(\varphi_{\text{кр}} + \frac{\varphi_{\text{кр}}}{z}\right)}} \times \frac{(f_{\text{мпB}} \cdot \sin \alpha + \cos \alpha)}{\left(f_{\text{мпB}} \cdot \sin\left(\alpha + \arcsin \frac{e \cdot \sin \varphi_{\text{кр}}}{r_B}\right) + \cos\left(\alpha + \arcsin \frac{e \cdot \sin \varphi_{\text{кр}}}{r_B}\right)\right) \cdot r_C (\sin \varphi_{\text{кр}} + f_{\text{мпC}} \cdot \cos \varphi_{\text{кр}})}, \quad (2)$$

где N_C – нормальная составляющая реакции в точке C ;

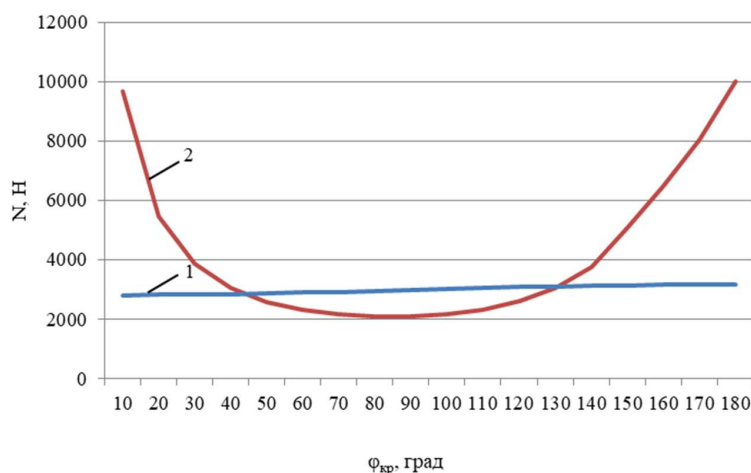
$f_{\text{мпC}}$ – коэффициент трения в точке C ;

r_C – расстояние, определяющее длину AC ;

$F_{\text{мпA}}$ – сила трения в точке A ;

$F_{\text{мпC}}$ – сила трения в точке C .

На основе уравнений (1) и (2) построены графики изменения значений нормальных сил в зацеплении и дополнительном эксцентрике (N_B и N_C) в зависимости угла поворота кривошипа O_1A , отображенные на рисунке 5.



1 – N_B нормальная сила в точке В; 2 – N_C нормальная сила в точке С

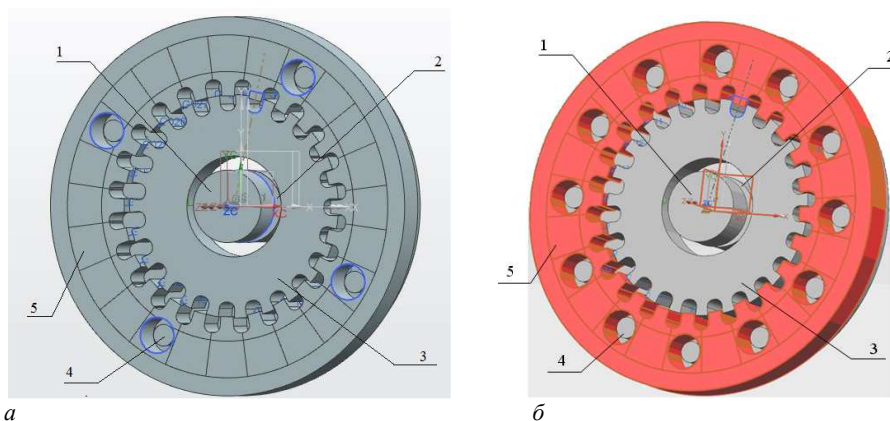
Рисунок 5. – Зависимости изменения значений нормальных сил в зацеплении и дополнительном эксцентрике от угла входного кривошипа $\varphi_{кр}$

На основе полученных графических зависимостей нормальных сил N_B и N_C были получены следующие выводы.

Нормальная сила N_B в зацеплении эксцентриковой передачи незначительно увеличивается с ростом значения угла поворота входного кривошипа $\varphi_{кр}$ и составляет не более 3500 Н для конкретного случая применения. Максимальное значение нормальной силы N_B в зацеплении может быть рассчитано по формуле (1), если коэффициент перекрытия имеет значение от 1 до 2 [3; 4].

Нормальная сила N_C при использовании только одного дополнительного эксцентрика в диапазоне угла поворота входного вала $0 \dots 180^\circ$ изменяется от 3500 Н до 10 000 Н. Для реализации эксцентриковой передачи необходимо, чтобы число дополнительных эксцентриков было не менее четырех. Поэтому для определения значений нормальных сил N_C при использовании не менее четырех дополнительных эксцентриков следует провести исследования с помощью компьютерных моделей.

Компьютерные исследования нормальных сил в зацеплении эксцентриковой передачи с поступательным движением сателлитного колеса. Для проведения анализа нормальных сил в точках В и С при поступательном движении сателлитного колеса были разработаны компьютерные модели (рисунок 6). Методика исследований эксцентриковых передач методами компьютерного моделирования рассмотрена в работе [5].



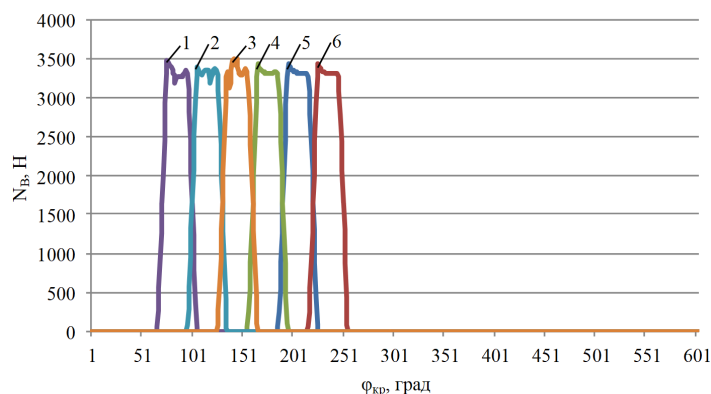
а – количество дополнительных эксцентриков равно четырем;
б – количество дополнительных эксцентриков равно двенадцати

1 – входной вал; 2 – эксцентрик входного вала; 3 – центральное зубчатое колесо;
4 – ось центрального диска; 5 – сателлитное колесо

Рисунок 6. – Компьютерные модели эксцентриковой передачи при поступательном движении сателлитного колеса

При вращательном движении входного вала 1 с жестко посаженным на него эксцентриком входного вала 2 происходит поступательное движение сателлитного колеса 5, благодаря взаимодействию отверстий сателлитного колеса 5 с неподвижными осями центрального диска 4. Внутренний венец сателлита 5 контактирует с наружными зубьями центрального колеса 3, приводя его во вращательное движение вокруг оси входного вала 1. Различия в предлагаемых компьютерных моделях заключаются в том, что число дополнительных эксцентриков в варианте *a* равно четырем, в варианте *б* – двенадцати.

По результатам компьютерных экспериментов (см. рисунок 6) были получены графические зависимости по определению нормальных сил N_B в указанных выше случаях (рисунок 7).

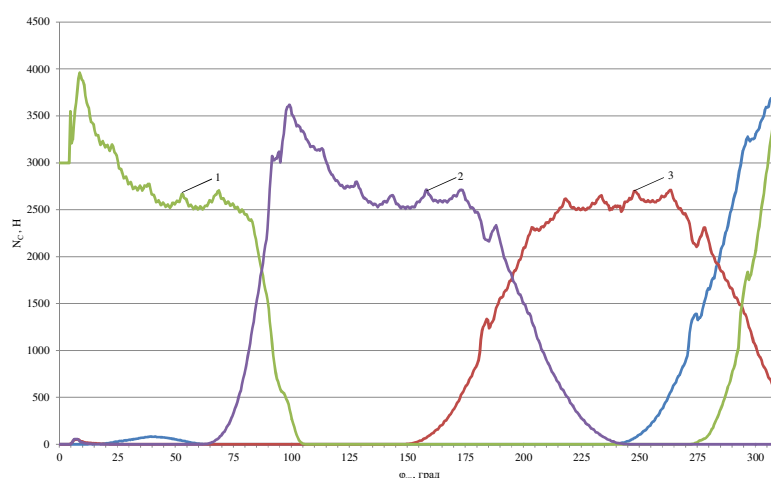


- 1 – первая контактная пара при двенадцати дополнительных эксцентриках;
- 2 – вторая контактная пара при двенадцати дополнительных эксцентриках;
- 3 – третья контактная пара при двенадцати дополнительных эксцентриках;
- 4 – первая контактная пара при четырех дополнительных эксцентриках;
- 5 – вторая контактная пара при четырех дополнительных эксцентриках;
- 6 – третья контактная пара при четырех дополнительных эксцентриках

Рисунок 7. – Графическая зависимость изменения нормальных сил N_B от угла поворота кривошипа $\Phi_{кр}$

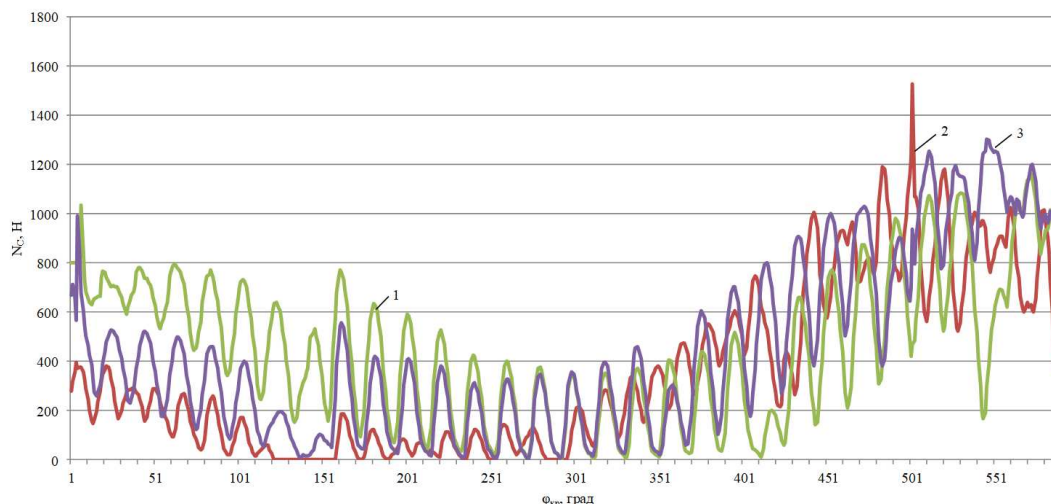
На основе данных графических зависимостей был сделан следующий вывод. Если учесть, что значения выходного момента и геометрических параметров эксцентриковой передачи одинаковы в различных контактных парах, то максимальное значение нормальной силы N_B как при четырех дополнительных эксцентриках, так и двенадцати не превышает значение 3500 Н. Как видно из графиков на рисунке 7, значения нормальных сил в зацеплении N_B соответствуют численным значениям расчетных нормальных сил N_B , показанных на графиках на рисунке 5.

Для оценки нормальных сил N_C в контакте между осями центрального диска 4 (см. рисунок 6) и отверстиями сателлитного колеса были получены следующие зависимости (рисунки 8 и 9).



- 1 – первая контактная пара; 2 – вторая контактная пара; 3 – третья контактная пара

Рисунок 8. – Графическая зависимость изменения нормальной силы N_C от угла поворота кривошипа $\Phi_{кр}$ в случае, когда число дополнительных эксцентриков равно четырем



1 – первая контактная пара; 2 – вторая контактная пара; 3 – третья контактная пара

Рисунок 9. – Графическая зависимость изменения нормальной силы N_c от угла поворота кривошипа $\Phi_{кр}$ в случае, когда число дополнительных эксцентров равно двенадцати

На рисунке 8 показаны графики в трех последовательных контактных парах между осями центрального диска 4 и отверстиями сателлитного колеса 3 в случае, когда число дополнительных эксцентров равно четырем. На рисунке 9 показаны графики в трех последовательных контактных парах между осями центрального диска 4 и отверстиями сателлитного колеса 3 в случае, когда число дополнительных эксцентров равно двенадцати.

Как видно из графиков на рисунке 8, максимальное значение нормальных сил N_c в случае, когда число дополнительных эксцентров равно четырем, составляет не более 4000 Н. В случае когда число дополнительных эксцентров равно двенадцати, наибольшее значение нормальной силы N_c находится на уровне 1500 Н. Следует отметить, что диапазон значений нормальных сил N_c при однопарном зацеплении лежит в пределах от 3500 Н до 10 000 Н (см. рисунок 5). Таким образом, значения нормальной силы N_c , подсчитанные аналитически по формуле (2), должны корректироваться с помощью коэффициентов, которые могут быть получены на основе использования методов компьютерного моделирования эксцентриковых передач.

С целью определения эксплуатационных показателей эксцентриковых передач при поступательном движении сателлитного колеса на основе их компьютерных моделей были проведены эксплуатационные испытания. Результаты проведенных испытаний отражены в работах [3; 4]. Показано, что число дополнительных эксцентров незначительно влияет на кинематическую погрешность. При этом КПД зацепления при четырех дополнительных эксцентриках в среднем выше на 2%, чем КПД зацепления при двенадцати дополнительных эксцентриках.

Заключение. На основе однопарного зацепления в эксцентриковой передаче при поступательном движении сателлитного колеса получены формулы для расчета нормальных сил в зацеплении с учетом того, что зубчатые колеса имеют прямобоочные зубья и значение коэффициента перекрытия находится в интервале от 1 до 2.

Нормальная сила в однопарном зацеплении N_c (см. рисунок 4) при использовании одного дополнительного эксцентрика в диапазоне поворота входного вала от 0° до 180° изменяется от 3500 до 10 000 Н. Для эффективной работы данной передачи необходимо, чтобы число дополнительных эксцентров было не менее четырех. Поэтому для определения значений нормальных сил N_c при использовании не менее четырех дополнительных эксцентров необходимо провести компьютерные исследования.

С целью определения эксплуатационных показателей эксцентриковых передач при поступательном движении сателлитного колеса использовались компьютерные модели. Определено, что кинематическая погрешность незначительно зависит от числа дополнительных эксцентров, передающих вращение от входного вала к входному валу. При этом КПД зацепления при четырех дополнительных эксцентриках в среднем выше на 2%, чем КПД зацепления при двенадцати дополнительных эксцентриках. На основе проведенных компьютерных исследований установлено, что число передающих движение дополнительных эксцентров должно быть не менее четырех и будет определяться как из условий контактной прочности, так и геометрическими параметрами передачи. Путем исследования компьютерных моделей эксцентриковой передачи при поступательном движении сателлитного колеса установлены эксплуатационные показатели, на основе которых приводится вывод о достаточности числа дополнительных эксцентров. На основе аналитических и ком-

пьютерных исследований предложены формулы для расчета значений нормальных сил в зацеплении и дополнительных эксцентриках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шанников, В.М. Планетарные редукторы с внецентроидным зацеплением / В.М. Шанников. – М. : Машгиз, 1948. – 172 с.
2. Борисенко, Л.А. Малогабаритные передаточные механизмы для мехатронных устройств / Л. А. Борисенко. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – 187 с.
3. Громыко, П.Н. Совершенствование механизма передачи движения на выходное звено в эксцентриковых передачах типа К-Н-V / П.Н. Громыко, С.Н. Хатетовский, Д.Ю. Макацария // Гор. механика и машиностроение. – 2021. – № 2. – С. 27–33.
4. Громыко, П.Н. Силовой анализ контактирующих зубьев эксцентриковой передачи, формообразованных на основе использования удлинённой эпициклоиды / П.Н. Громыко, Д.Ю. Макацария, Р.А. Бондарев // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2021. – № 3. – С. 5–13.
5. Компьютерное моделирование планетарных прецессионных передач / П.Н. Громыко [и др.] ; под общ. ред. П.Н. Громыко. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2007. – 271 с.

REFERENCES

1. Shannikov, V.M. (1948). *Planetarnye reduktory s vnecentroidnym zacepleniem* [Planetary gearboxes with eccentric gearing]. Moscow: Mashgiz. (In Russ.).
2. Borisenko, L.A. (2013). *Malogabaritnye peredatochnye mekhanizmy dlya mekhatronnykh ustrojstv* [Small-sized transmission mechanisms for mechatronic devices]. Mogilev: Belarusian-Russian University. (In Russ.).
3. Gromyko, P.N., Hatetovskij, & S.N., Makacariya, D.Yu. (2021). Sovershenstvovanie mekhanizma peredachi dvizheniya na vyhodnoye zveno v ekscentrikovykh peredachah tipa K-H-V [Improvement of mechanism of motion transfer to output link in eccentric transmissions of K-H-V type]. *Gornaya mekhanika i mashinostroenie* [Mining mechanical engineering and machine-building], 2, 27–33. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Gromyko, P.N., Makacariya, D.Yu., & Bondarev, R.A. (2021). Silovoy analiz kontaktiruyushchih zub'ev ekscentrikovoy peredachi, formoobrazovannykh na osnove ispol'zovaniya udlinennoj epicikloidy [Force analysis of contact teeth in the eccentric transmission formed by using the elongated epicycloide]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta* [The Belarussian-Russian university herald], 3, 5–13. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Gromyko, P.N., Zholobov, A.A., Hatetovskij, S.N., Galyuzhin, D.S., & Dokonov, L.G. (2007). *Komp'yuternoe modelirovanie planetarnykh precessionnykh peredach* [Computer simulation of planetary precession gears]. Mogilev: Belarusian-Russian University. (In Russ.).

Поступила 09.11.2021

DETERMINATION OF NORMAL FORCES IN ENGAGEMENT OF ECCENTRIC GEAR AT FORWARD MOTION OF SATELLITE WHEEL

P. GROMYKO, D. MAKATSARYIA, S. KHATETOVSKY

The article presents formulas for calculation of normal forces in engagement and additional eccentric at translational motion of satellite wheel. It is shown that the value of normal force in engagement in analytical calculations is the basis for determining its significant geometric parameters. Based on computer studies, it is shown that the number of motion transmitting additional eccentrics should be at least four, and will be determined both from the conditions of contact strength of the contacting links and the geometric parameters of the transmission. Computer models of eccentric transmission at translational motion of satellite wheel have been investigated. Operational parameters of eccentric transmission are obtained, on the basis of which a conclusion is given about a sufficient number of additional eccentrics. On the basis of analytical and computer studies, formulas are proposed for calculating the values of normal forces in the engagement and additional eccentric during translational movement. They can be used to create drive mechanisms that have not only minimal overall dimensions, but also various performance indicators, such as efficiency and kinematic accuracy of the output shaft.

Keywords: additional eccentric, circular trajectory, normal force in eccentric transmission, translational motion of satellite, eccentric transmission.

УДК 658.512

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО БАЗИРОВАНИЮ МОДЕЛЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ 3D-ПРИНТЕРОВ

д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК
(Полоцкий государственный университет),
канд. техн. наук, доц. Н.В. БЕЛЯКОВ, Д.А. ЯСНЕВ
(Витебский государственный технологический университет)

На основе понятий проектного базирования при аддитивном синтезе представлена система поддержки принятия решений для ориентации моделей деталей машин в рабочей зоне 3D-принтера, включающая последовательное определение и идентификацию возможных составов баз ориентации поверхностей, определение параметров геометрической точности 3D-принтера, формирование базовой системы координат (за счет наложения на модель геометрических связей) и ее привязке к системе координат 3D-принтера. С помощью системы на стадии проектирования возможно прогнозировать обеспечение точности допусков взаимного расположения поверхностей при 3D-печати и рекомендовать варианты базирования моделей деталей в рабочей зоне принтера на основе анализа его геометрической точности для обеспечения этих допусков. Система может использоваться в проектных бюро предприятий, использующих 3D-принтеры; IT-компаниях для создания и совершенствования программ-слайсеров; учебном процессе для подготовки специалистов в области производства изделий на основе трехмерных технологий.

Ключевые слова: аддитивные технологии, слайсер, 3D-печать, 3D-принтер, базирование, допуск взаимного расположения, погрешность, геометрическая точность, подготовка производства, машиностроение.

Введение. В современном машиностроении все большее применение находят такие аддитивные технологии, как FDM (послойное наложение расплавляемых нитевидных полимеров); SLA (отверждение слоя фотополимера посредством лазерного луча); SLS, DMF, SLM (послойное лазерное спекание и плавление) порошковых материалов (полимеров или металлопорошковых композиций); DLP (засветка слоя фотополимера цифровым прожектором); Poly-Jet (отверждение слоя фотополимера ультрафиолетовой лампой); Ink-Jet (отверждение слоя порошкового материала путем нанесения связующего состава через многосопловую головку). Перечисленные технологии реализуются с помощью 3D-принтеров, основными узлами которых являются рамы, механизмы перемещения (двигатели и направляющие), слоеформирующие элементы (экструдеры, лазеры, головки, лампы, прожекторы), рабочие платформы, электроника [1–3].

На машиностроительных предприятиях 3D-принтеры применяются:

- для прототипирования изделий (оценка эргономических качеств изделия; проверка собираемости и правильности компоновочных решений; гидроаэродинамические и другие испытания; предварительная проверка функциональности; дизайнерские модели с различными нюансами в конфигурации, цветовыми гаммами раскраски и т.д.);
- литейного производства (создание литейных моделей, литейных форм и другой модельной оснастки);
- производства деталей машин.

Важнейшими параметрами качества деталей машин являются точность размеров и допусков взаимного расположения поверхностей. В аддитивном производстве при 3D-печати точностные параметры деталей обуславливаются рядом факторов, таких как: 1) технология печати; 2) применяемая для печати марка материала; 3) толщина слоя печати (разрешение); 4) конструкция поддержек; 5) температурные деформации материала в процессе затвердения; 6) компоновочная схема принтера; 7) жесткость и точность изготовления деталей принтера; 8) качество сборки и калибровки принтера; 9) конструкция и точность механических передач и приводов (точность перемещения слоеформирующих элементов); 10) конструкция и ориентация направляющих; 11) ориентация модели детали при печати и др.^{1,2,3} [4; 5].

Факторы в пп. 6–11 оказывают особое влияние на взаимное расположение слоев при печати и, как следствие, на обеспечение точности допусков взаимного расположения поверхностей. Если допуски взаимного расположения не обеспечены, то деталь неизбежно перейдет в неустранимый брак. Задачи обеспечения точности допусков взаимного расположения поверхностей деталей машин в аддитивном производстве должны

¹ 3D-Today [Электронный ресурс] : О «правильном» и «неправильном» расположении моделей при печати на фотополимерном принтере / Сайт производителя. URL: <https://3dtoday.ru/blogs/pl32/o-pravilnom-i-nepravilnom-raspolozhenii-modelei-pri-pecati-na-fotopolimernom-printere>

² 3D-Printer [Электронный ресурс] : Как ориентация детали влияет на 3D печать? / Сайт производителя. URL: <https://3dprinter.ua/kak-orientacija-detali-vlijaet-na-3d-pechat/>

³ Гусев, Д.В. Повышение показателей качества изготавливаемых изделий при использовании технологии быстрого прототипирования : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Д.В. Гусев ; ФГБОУ ВО «УлГТУ». – Ульяновск, 2019. – 17 с.

решаться уже на этапе базирования (ориентации) модели детали в рабочей зоне принтера с помощью программ-слайсеров за счет правильного выбора баз с учетом точности принтера.

Анализ процедур формирования модели детали. Для аддитивного синтеза на 3D-принтере по всем технологиям вначале с помощью CAD-системы формируется ее трехмерная модель. После этого модель преобразуется в формат, подходящий для печати (для большинства 3D-принтеров это формат STL). Далее с помощью программ-слайсеров (UltimakerCura, 3DPrinterOS, Astroprint, IceSL, ideaMaker, KISSlicer, MakerBot Print, MatterControl, Netfab Standart, Octoprint, Repetier, SelfCAD, SlicerCrafter, Tinkering Suite, Simplify3D, Slic3r, Craftware и др) модель разбивается на 2D-слои и формируется G-код [6; 7].

Работа во всех слайсерах организована таким образом, что пользователю необходимо ввести информацию в ряде блоков настроек: 1) настройки программы (выбор языка, единиц измерения, расширенные функции, цветовое оформление, параметры отображения, информационные вкладки); 2) подключение принтера (выбор марки и модели, управление действиями экструдера, установка температуры и скорости, указание количества печатающих головок); 3) выбор филамента и вида материала; 4) работа с моделью (ориентирование, масштабирование, модификация, анализ); 5) параметры слайсинга (порядок разбиения на слои, поддержки, стенки и др.); 6) дополнительные установки (включение паузы для смены филамента, холостые передвижения и пр.).

В блоке «Работа с моделью» пользователю необходимо произвести ориентирование (базирование) модели детали в рабочей зоне принтера (рисунок 1). Эта процедура осуществляется пользователем на основе собственного опыта и интуиции. В литературных источниках приводится только ряд рекомендаций (иногда исключающих друг друга) общего характера: расположение детали влияет на количество поддержек (расход материала и стоимость изделия); если габаритные размеры модели больше габаритных размеров рабочей зоны принтера по трем осям, то следует проверить возможность размещения модели в рабочей зоне по диагонали; цилиндры печатаются быстрее, если они расположены в рабочей зоне горизонтально; цилиндры печатаются качественнее, если они расположены в рабочей зоне вертикально; при ориентации следует учитывать условия работы детали при эксплуатации в связи с анизотропией напечатанной детали и др.^{4,5,6} [4; 5].

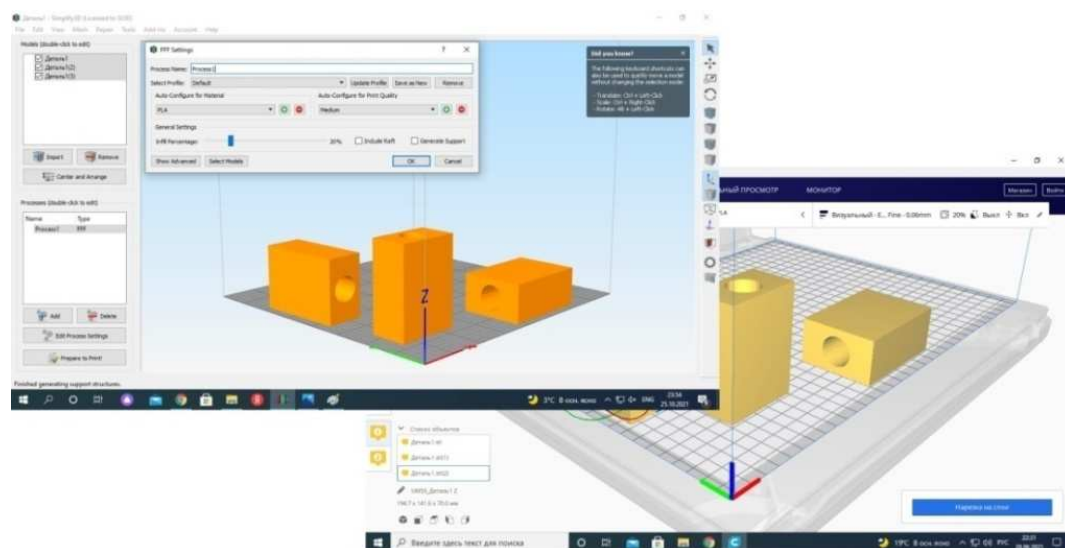


Рисунок 1. – Базирование детали в рабочей зоне 3D-принтера с помощью программ-слайсеров UltimakerCura и Simplify3D

В опубликованных работах также приводятся результаты экспериментальных исследований влияния параметров печати на точность изделий [4; 5]. Для этого на конкретном 3D-принтере распечатывались опытные детали, производились исследования их точностных параметров и делались выводы о необходимости использования полученных данных для прогнозирования точности последующей печати. Вопросы влияния различной ориентации детали в рабочей зоне 3D-принтера на обеспечение точности допусков взаимного расположения с учетом параметров геометрической точности принтера не рассматривались.

⁴ 3D-Today [Электронный ресурс] : О «правильном» и «неправильном» расположении моделей при печати на фотополимерном принтере / Сайт производителя. URL: <https://3dtoday.ru/blogs/pl32/o-pravilnom-i-nepravilnom-raspolozhenii-modelei-pri-pecati-na-fotopolimernom-printere>

⁵ 3D-Printer [Электронный ресурс] : Как ориентация детали влияет на 3D печать? / Сайт производителя. URL: <https://3dprinter.ua/kak-orientacija-detali-vlijaet-na-3d-pechat/>

⁶ Гусев, Д.В. Повышение показателей качества изготавливаемых изделий при использовании технологии быстрого прототипирования : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Д.В. Гусев ; ФГБОУ ВО «УлГТУ». – Ульяновск, 2019. – 17 с.

Таким образом, целью работы является разработка методического, алгоритмического и программного обеспечения базирования моделей деталей машин в рабочей зоне 3D-принтеров на основе анализа их геометрической точности для обеспечения заданных чертежом допусков взаимного расположения поверхностей.

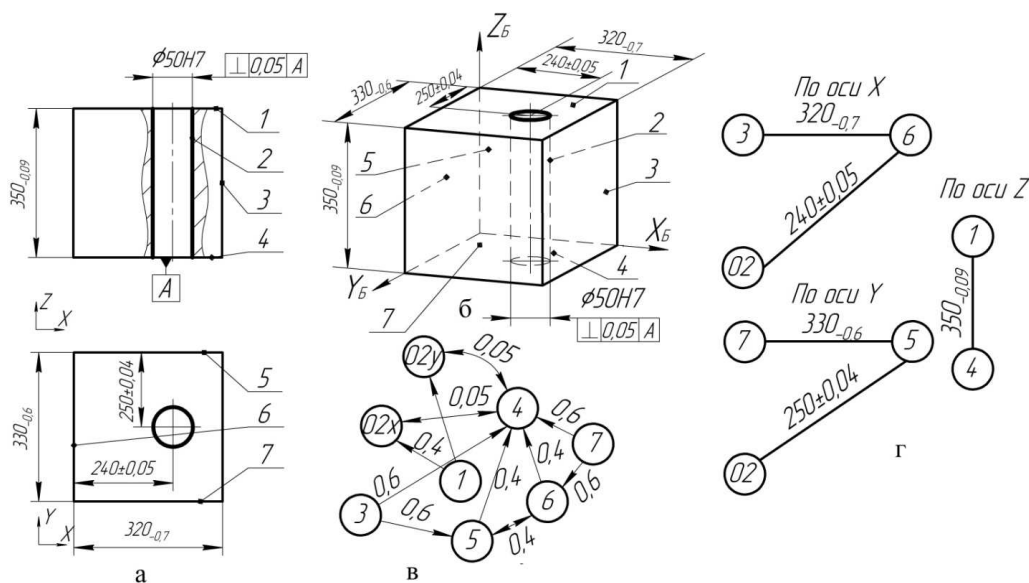
Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи: проведен анализ современных подходов к теории базирования, а также предложен ряд терминов проектного базирования при аддитивном синтезе; разработано методическое и алгоритмическое обеспечение процедуры базирования моделей деталей машин в рабочей зоне 3D-принтеров; разработан алгоритм функционирования и общая структура системы поддержки принятия решений по базированию моделей деталей машин в рабочей зоне 3D-принтеров; определена конфигурация технических средств; разработано программное обеспечение и проведены его комплексная отладка и предварительные испытания; разработаны программные документы; проведена опытная эксплуатация системы.

Для исследования и решения поставленных в работе задач использовались методы теории базирования, теории автоматизации проектирования, системно-структурного анализа и моделирования. Проводился анализ литературных источников, электронных изданий, а также опыта использования программ-слайсеров для базирования моделей деталей машин при 3D-печати.

Результаты исследований. Анализ современных подходов к теории базирования⁷ [8–14] позволил уточнить ряд терминов проектного базирования для аддитивного синтеза и предложить следующую последовательность процедур для проектного базирования модели детали в рабочей зоне 3D-принтера: 1) синтез геометрической модели детали (ГМД); 2) определение составов баз ориентации; 3) идентификация состава баз ориентации; 4) определение приоритета в обеспечении допуска взаимного расположения; 5) синтез схемы базирования (определение комплектов баз); 6) определение компоновочно-кинематической схемы и задание системы координат 3D-принтера; 7) определение достижимой геометрической точности 3D-принтера; 8) определение ориентации модели детали в рабочей зоне 3D-принтера.

Процедура 1. Под ГМД будем понимать модель, отражающую поверхности (в т.ч. плоскости, оси и точки симметрии) и их расположение с помощью размерных связей (линейных и угловых) и допусков взаимного расположения согласно их простановке на чертеже детали или исходной заготовке (графам линейных размерных связей (по трем осям) и угловым расположениям). Модель представляет собой абсолютно твердое тело, в котором все поверхности идеальны (не имеют погрешностей формы и микронеровностей). ГМД строится на основе чертежа детали.

Для построения ГМД (рисунок 2) необходимо: построить контурное изображение (или трехмерную модель) ГМД; произвести нумерацию поверхностей; проставить размерные связи и допуски взаимного расположения поверхностей согласно чертежу; построить графы линейных размерных связей и угловых расположений поверхностей [13; 14].



а – контурное изображение модели детали с нумерацией поверхностей и размерами;
б – пространственная иллюстрация модели детали с нумерацией поверхностей и размерами;
в – граф угловых расположений; **г** – графы линейных размерных связей

Рисунок 2. – Геометрическая модель детали

⁷ Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения [Электронный ресурс] : ГОСТ 21495-76. – Введ. 01.01.1977. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200009548>

Процедура 2. Состав баз ориентации – совокупность поверхностей (в общем случае плоскостей и (или) осей) ГМД, по отношению к которой однозначно и корректно может быть задана ориентация рассматриваемой поверхности (совокупности поверхностей) и проведена система координат. Возможны четыре варианта составов баз (рисунок 3, P – плоскость, O – ось).

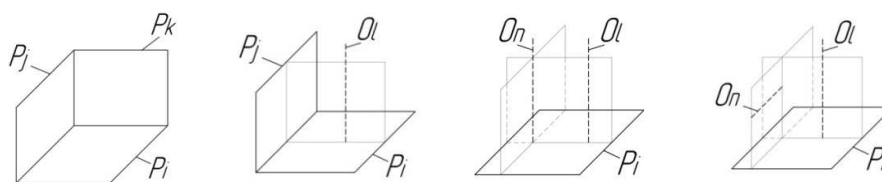


Рисунок 3. – Составы баз ориентации

Формальное выявление возможных составов баз ориентации (для рассматриваемой оси или плоскости) предлагается осуществлять с помощью совместного анализа графов размерных и угловых связей. Для этого номер обрабатываемой поверхности (ее оси или плоскости) отыскивается на графе (по одной оси для плоской поверхности, по двум координатным осям для оси) линейных размерных связей. Определяется ее связь или связи с другими ближайшими поверхностями на графах размерных связей (кратчайшие пути на графе от рассматриваемой поверхности до других поверхностей). Далее для плоских поверхностей на графах угловых расположений состав дополняется двумя поверхностями, для оси – одной.

Так, для плоскости 1 из графа линейных связей по Z отбирается поверхность 4, а с помощью графа угловых расположений состав формируется с помощью поверхностей $o2_x$ и $o2_y$. Для оси $o2$ из графов линейных связей по X и Y отбираются поверхности 5 и 6, а с помощью графа угловых расположений состав формируется с помощью поверхности 4 (таблица 1).

Таблица 1 – Составы баз ориентации для рассматриваемой детали

1	$o2$	3	4	5	6	7
4- $o2_x$ - $o2_y$	5-6-4	6-4-5	1- $o2_x$ - $o2_y$	7-4-6 $o2_y$ -4-6	$o2_x$ -4-5 3-4-5	5-4-6

Процедура 3. Для определения принадлежности (идентификации) сформированных составов баз к одному из описанных выше определяется вид (ось или плоскость) каждой из поверхностей таблицы составов баз. Так, для поверхности 1 сформирован состав 4- $o2_x$ - $o2_y$ – три плоскости, две из которых проходят через ось (иначе две плоскости и ось (состав № 2), для $o2$ сформирован состав 5-6-4 – три взаимно перпендикулярные плоскости (состав № 1) и т.д.

Процедура 4. Определение приоритета в обеспечении допуска взаимного расположения предлагается осуществлять ранжированием численных значений допусков по компонентам состава баз (таблица 2), приведением к одной базовой длине (определение удельного допуска) и последующего определения главной базы (в зависимости от этого значения).

Таблица 2 – Определение удельных допусков

Поверхность	Состав баз	Допуск		Длина	Удельный допуск (на длине 1000 мм)
		Наименование	Значение		
...	...	...	...	...	...
$o2$	5	Размер	0,08	350	0,229
	6	Размер	0,1	350	0,286
	4	$\perp$	0,05	350	0,143
...	...	...	...	...	...
5	4	$\perp$	0,4	350	1,143
	6	$\perp$	0,4	320	1,250
	7	Размер	0,6	350	1,714
...	...	...	...	...	...

Согласно таблице 2 для рассматриваемого примера приоритетным является допуск перпендикулярности поверхности $o2$ относительно поверхности 4. Поверхность 4 – главная база.

Процедура 5. Под схемой базирования при аддитивном синтезе предлагается понимать графическое изображение ГМД, на которой: 1) выделены поверхности (совокупности поверхностей) с приоритетным допуском взаимного расположения; 2) проставлены размерные связи и допуски взаимного расположения; 3) обозначен комплект технологических баз; 4) проведена базовая (собственная) система координат.

Технологической базой при аддитивном синтезе будем считать поверхность (или сочетание поверхностей) ГМД, по отношению к которой(ому) задается ориентация поверхности (совокупности поверхностей) с приоритетным допуском взаимного расположения, накладывающая на ГМД определенные геометрические

связи и идентифицирующая одну из плоскостей или (и) осей базовой системы координат. Комплект технологических баз – совокупность технологических баз, полностью идентифицирующих состав баз ориентации и накладывающих на ГМД 6 геометрических связей относительно осей базовой системы координат. Элементами комплекта являются: тройная однонаправленная (установочная) технологическая база – 3 связи (определенность углового расположения относительно двух осей и линейного относительно третьей); двойная однонаправленная (направляющая) – 2 связи (определенность углового положения относительно одной и линейного относительно другой) и т.д. Технологические базы могут *сочетаться* между собой в комплект девятью различными способами [14]. Комплект баз на схеме базирования обозначается условными значками, интерпретирующими связи и их направления (рисунок 4).

Для синтеза схемы базирования модернизирован массив производственных моделей, соответствующих вариантам однозначного задания ориентации поверхности [13; 14]. Так, для состава баз ориентации № 1 алгоритм O_{10} гласит: если приоритетным является допуск перпендикулярности оси O_{10} относительно плоскости P_i , а допуск линейного размера относительно $P_{j(k)}$ меньше допуска линейного размера относительно $P_{k(j)}$, то плоскость P_i назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость $P_{j(k)}$ – двойной однонаправленной (направляющей), плоскость $P_{k(j)}$ – одиночной (опорной). Аналогично определяются компоненты комплекта, если задан допуск перпендикулярности относительно плоскости P_j либо плоскости P_k (рисунок 4).

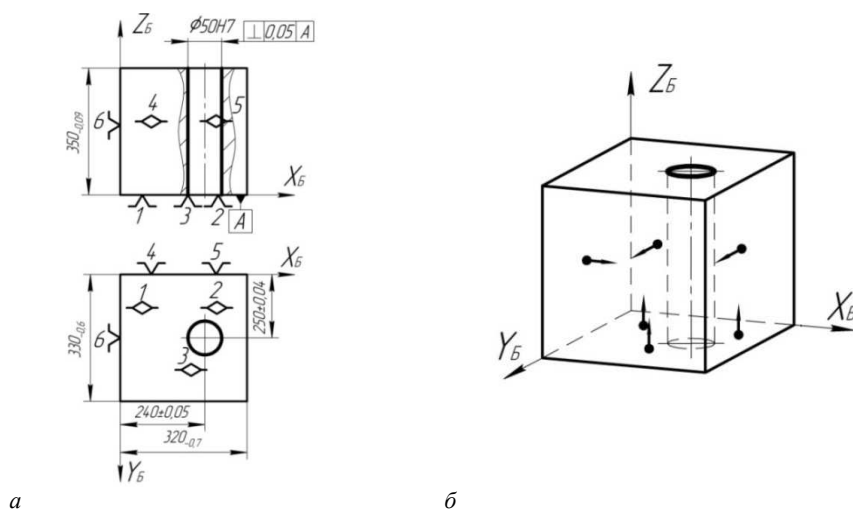


Рисунок 4. – Схема базирования (а) и модель расположения связей и их направлений (б)

Процедура 6. Компоночно-кинематические схемы и системы координат 3D-принтера определяют методику анализа точности перемещений и ориентацию базовой системы координат детали в системе координат принтера. На рисунке 5 приведены элементы разработанного классификатора компоновочно-кинематических схем FDM-принтеров.

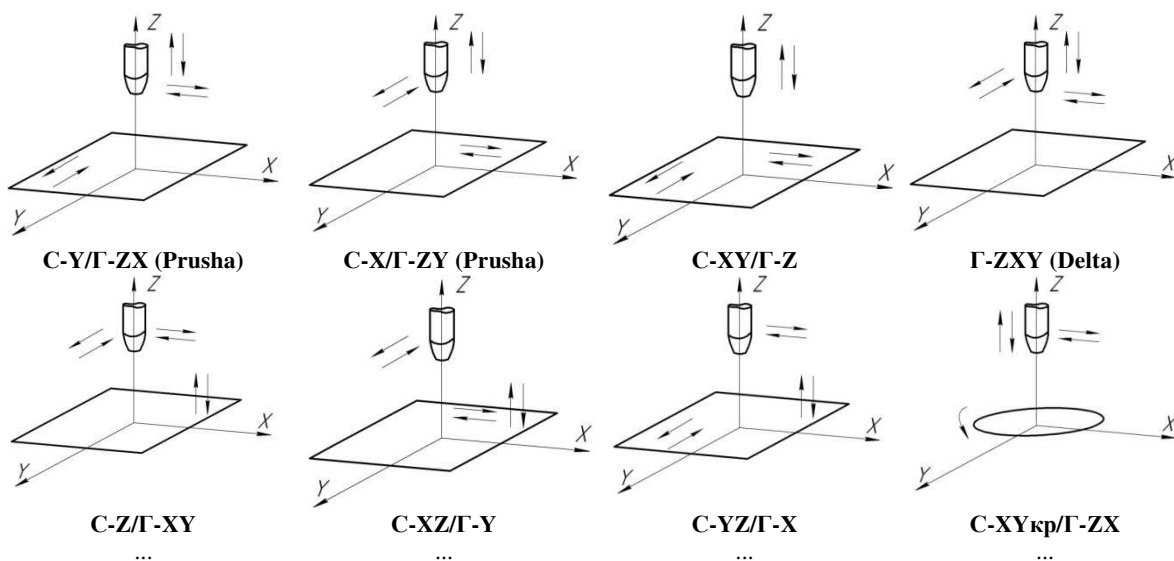


Рисунок 5. – Элементы классификатора компоновочно-кинематических схем FDM-принтеров

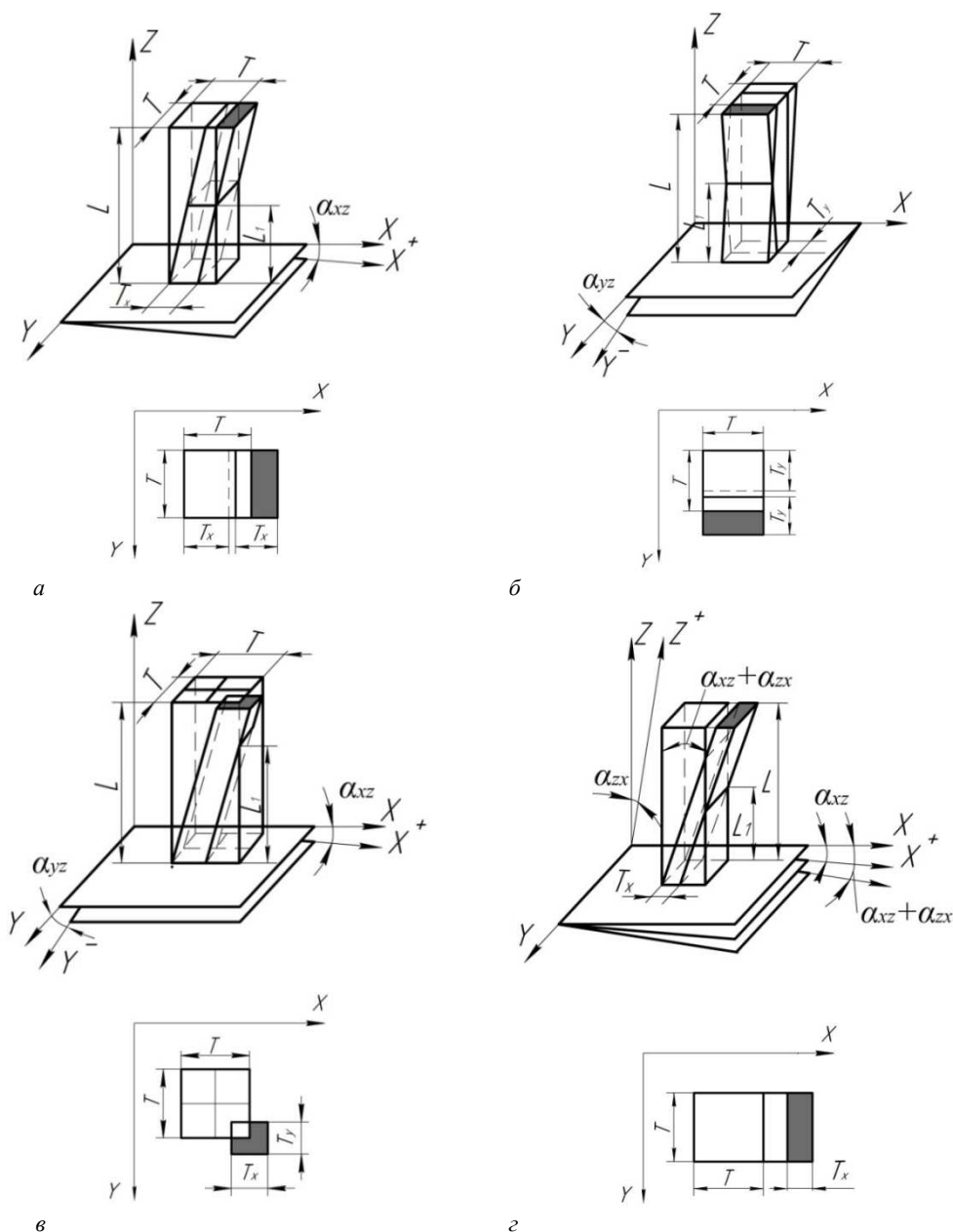


Рисунок 7. – Размещения полей допусков перпендикулярности оси относительно плоскостей T и T_x (а, з), T и T_y (б, в) в зависимости от геометрической точности

Также возможен случай «наложения» геометрической погрешности расположения направляющих по осям X и Z от (см. рисунок 7, з) или Y и Z , что уменьшает область обеспечения допуска перпендикулярности в заданном координатном направлении. И наоборот, возможен случай компенсации погрешностей (в случае если по осям X и Z (или Y и Z) имеется геометрическая погрешность направляющих в противоположных угловых направлениях).

На рисунке 7 прямоугольниками показаны области полей допусков T и T_x в плоскости длины рассматриваемого элемента. Если квадрат поля допуска T не пересекается с прямоугольником точности позиционирования $T_{x(y)}$, то допуск обеспечить на всей длине невозможно. В случае частичного пересечения указанных полей допусков можно говорить о вероятности обеспечения допуска. Таким образом, появляется возможность спрогнозировать точность взаимного расположения поверхностей на длине, а также рекомендовать углы поворота модели для обеспечения допусков.

Анализ обеспечения допуска перпендикулярности в случае параллельности рассматриваемой оси Z сводится к проверке условий

$$T \geq T_x, \quad T \geq T_y, \quad L \leq L_{1x^{\pm}z^{\pm}}, \quad L \leq L_{1y^{\pm}z^{\pm}},$$

где

$$\begin{aligned}
 L_{1x^{\pm}z^{\pm}} &= \frac{T - T_x}{\operatorname{tg}(\pm\alpha_{xz} \pm \alpha_{zx})}, \\
 L_{1x^{\pm}z^{+}} &= \frac{T - T_x}{\operatorname{tg}(\alpha_{xz} + \alpha_{zx})}, L_{1x^{\pm}z^{-}} = \frac{T - T_x}{\operatorname{tg}(|\alpha_{xz} - \alpha_{zx}|)}, \\
 L_{1x^{-}z^{+}} &= \frac{T - T_x}{\operatorname{tg}(|-\alpha_{xz} + \alpha_{zx}|)}, L_{1x^{-}z^{-}} = \frac{T - T_x}{\operatorname{tg}(|-\alpha_{xz} - \alpha_{zx}|)}, \\
 L_{1y^{\pm}z^{\pm}} &= \frac{T - T_y}{\operatorname{tg}(\pm\alpha_{yz} \pm \alpha_{zy})}, \\
 L_{1y^{\pm}z^{+}} &= \frac{T - T_y}{\operatorname{tg}(\alpha_{yz} + \alpha_{zy})}, L_{1y^{\pm}z^{-}} = \frac{T - T_y}{\operatorname{tg}(|\alpha_{yz} - \alpha_{zy}|)}, \\
 L_{1y^{-}z^{+}} &= \frac{T - T_y}{\operatorname{tg}(|-\alpha_{yz} + \alpha_{zy}|)}, L_{1y^{-}z^{-}} = \frac{T - T_y}{\operatorname{tg}(|-\alpha_{yz} - \alpha_{zy}|)}.
 \end{aligned}$$

Анализ обеспечения допуска перпендикулярности в случае параллельности рассматриваемой оси к осям X и Y сводится к проверке условий

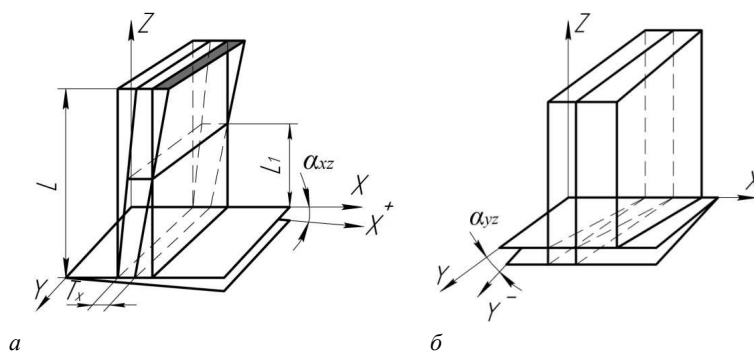
$$T \geq T_z, \quad T \geq T_y, \quad L \leq L_{1x^{\pm}z^{\pm}}, \quad L \leq L_{1y^{\pm}z^{\pm}}, \quad T \geq T_x, \quad T \geq T_z, \quad L \leq L_{1x^{\pm}y^{\pm}}, \quad L \leq L_{1y^{\pm}z^{\pm}}.$$

Пусть необходимо найти ориентацию тройной однонаправленной (установочной) базы, обеспечивающей приоритетную перпендикулярность *плоскости* относительно плоскости в системе координат принтера.

В случае поворота плоскости XOY , в которой может размещаться тройная однонаправленная (установочная) база на угол α_{xz} , допуск перпендикулярности T может быть обеспечен только на длине L_1 (рисунок 8, а):

$$L_{1xz} = \frac{T - T_x}{\operatorname{tg}\alpha_{xz}}.$$

Поворот плоскости XOY (зеркало стола), в которой может размещаться тройная однонаправленная (установочная), на угол α_{yz} никак не влияет на допуск перпендикулярности T (рисунок 8, б).



а – на длине L_1 и угле α_{xz} ; б – на угле α_{yz}

Рисунок 8. – Размещения полей допусков перпендикулярности плоскости относительно плоскости T и $T_{x(y)}$, в зависимости от геометрической точности

Также возможен случай «наложения» геометрической погрешности расположения направляющих по осям X и Z , что уменьшает область обеспечения допуска перпендикулярности в заданном координатном направлении. И наоборот, возможен случай компенсации погрешностей если по осям X и Z имеется геометрическая погрешность направляющих в противоположных угловых направлениях.

Анализ обеспечения допуска перпендикулярности в случае параллельности рассматриваемой плоскости плоскостям ZOY или ZOX сводится к проверке условий

$$T \geq T_x, \quad L \leq L_{1x^{\pm}z^{\pm}} \quad \text{или} \quad T \geq T_y, \quad L \leq L_{1y^{\pm}z^{\pm}}$$

Анализ обеспечения допуска перпендикулярности в случае параллельности рассматриваемой плоскости плоскостям XOZ или XOY сводится к проверке условий:

$$T \geq T_y, L \leq L_{1y^{\pm}x^{\pm}} \quad \text{или} \quad T \geq T_z, L \leq L_{1x^{\pm}z^{\pm}}.$$

Анализ обеспечения допуска перпендикулярности в случае параллельности рассматриваемой плоскости плоскостям YOX или YOZ сводится к проверке условий

$$T \geq T_z, L \leq L_{1y^{\pm}z^{\pm}} \quad \text{или} \quad T \geq T_x, L \leq L_{1x^{\pm}y^{\pm}}.$$

Определение оптимальной плоскости системы координат 3D-принтера предлагается осуществлять с помощью матриц ориентации. В таблице 3 представлена матрица для определения ориентации тройной однонаправленной (установочной) базы перпендикулярно плоскостям системы координат принтера для обеспечения перпендикулярности оси относительно плоскости с вероятностью 100%, в таблице 4 – для обеспечения перпендикулярности соответствующей плоскости.

Таблица 3. – Матрица для определения ориентации тройной однонаправленной (установочной) базы для обеспечения перпендикулярности оси относительно плоскости

		X		Y		Z	
		X^+	X^-	Y^+	Y^-	Z^+	Z^-
X	X^+			$L_{1x^+y^+}$	$L_{1x^+y^-}$	$L_{1x^+z^+}$	$L_{1x^+z^-}$
	X^-			$L_{1x^-y^+}$	$L_{1x^-y^-}$	$L_{1x^-z^+}$	$L_{1x^-z^-}$
Y	Y^+	$L_{1x^+y^+}$	$L_{1x^+y^-}$			$L_{1y^+z^+}$	$L_{1y^+z^-}$
	Y^-	$L_{1x^-y^+}$	$L_{1x^-y^-}$			$L_{1y^-z^+}$	$L_{1y^-z^-}$
Z	Z^+	$L_{1x^+z^+}$	$L_{1x^+z^-}$	$L_{1y^+z^+}$	$L_{1y^+z^-}$		
	Z^-	$L_{1x^-z^+}$	$L_{1x^-z^-}$	$L_{1y^-z^+}$	$L_{1y^-z^-}$		
Проверка условий		$L \leq L_{1x^{\pm}y^{\pm}}; L \leq L_{1x^{\pm}z^{\pm}}$		$L \leq L_{1x^{\pm}y^{\pm}}; L \leq L_{1y^{\pm}z^{\pm}}$		$L \leq L_{1x^{\pm}z^{\pm}}; L \leq L_{1y^{\pm}z^{\pm}}$	
Тройная однонаправленная (установочная) база		YOZ		XOZ		XOY	

Таблица 4. – Матрица для определения ориентации тройной однонаправленной (установочной) базы при обеспечении перпендикулярности плоскости (параллельной ZOY или XOZ или YOX) относительно плоскости

		X		Y		Z	
		X^+	X^-	Y^+	Y^-	Z^+	Z^-
X	X^+			$L_{1x^+y^+}$	$L_{1x^+y^-}$		
	X^-			$L_{1x^-y^+}$	$L_{1x^-y^-}$		
Y	Y^+					$L_{1y^+z^+}$	$L_{1y^+z^-}$
	Y^-					$L_{1y^-z^+}$	$L_{1y^-z^-}$
Z	Z^+	$L_{1x^+z^+}$	$L_{1x^+z^-}$				
	Z^-	$L_{1x^-z^+}$	$L_{1x^-z^-}$				
Проверка условий		$L \leq L_{1x^{\pm}z^{\pm}}$		$L \leq L_{1x^{\pm}y^{\pm}}$		$L \leq L_{1y^{\pm}z^{\pm}}$	
Тройная однонаправленная (установочная) база		XOY		YOZ		XOZ	

В случае если заданный допуск взаимного расположения невозможно обеспечить при ориентации главной базы перпендикулярно плоскостям системы координат принтера на всей длине с вероятностью 100%, то необходимо определить углы поворота базовой поверхности, позволяющие полностью разместить поле допуска $T_{x(y,z)}$ в поле допуска T (см. рисунок 7). Для определения углов поворота несложно составить соответствующие модели, учитывающие геометрическую точность принтера $\alpha_{xz(xy)}$, $\alpha_{zx(zy)}$, $\alpha_{yz(yx)}$. При этом следует учитывать, что при повороте модели вокруг осей X и Y возникает необходимость использования поддержек.

Аналогичные рассуждения позволили составить матрицы для определения ориентации главных баз и сочетаний главной базы с другими базами в системе координат принтера в зависимости от необходимости обеспечения приоритетных допусков взаимного расположения, а также разработать программное обеспечение для определения ориентации главных баз (рисунок 9).

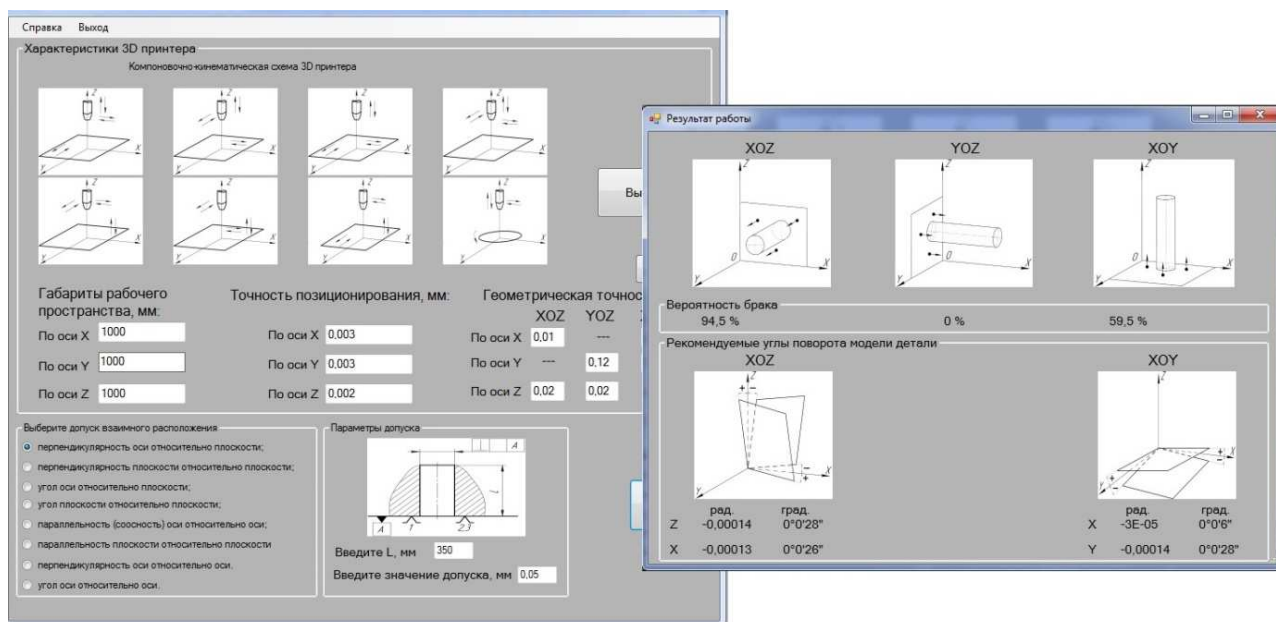


Рисунок 9. – Интерфейсы программного обеспечения системы поддержки принятия решений

Программное обеспечение разработано на языке C# в виртуальной среде Microsoft Visual Studio 2019 с использованием стандартных элементов и математических функций. При работе с системой пользователь последовательно вводит информацию о компоновочно-кинематической схеме принтера, его точности позиционирования и геометрической точности по осям, параметрах поверхности с приоритетным допуском. Результатом работы являются сведения о возможности обеспечения допуска взаимного расположения на заданной длине при различном базировании модели детали относительно осей системы координат принтера, а также рекомендации о возможном повороте модели для обеспечения приоритетного допуска взаимного расположения.

Заключение. В результате исследований предложена система терминов проектного базирования при аддитивном синтезе, которая за счет определения понятий геометрической модели детали, приоритетного допуска, состава и комплекта баз, схемы базирования позволила дать последовательность процедур базирования (ориентации) моделей деталей машин в рабочей зоне 3D-принтеров. Последовательность процедур включает: определение и индентификацию возможных составов баз ориентации конструктивных элементов, определение параметров геометрической точности 3D-принтера, формирование базовой системы координат (за счет наложения на модель геометрических связей) и ее привязку к системе координат 3D-принтера, и уже на стадии проектирования позволяет оценить достижимость заданных чертежом допусков взаимного расположения конструктивных элементов, а также рекомендовать варианты ориентации модели детали в рабочей зоне 3D-принтера для обеспечения допусков взаимного расположения.

Представление методики на языке теории автоматизации проектирования, алгебры логики и теории алгоритмов дало возможность создать автоматизированную систему поддержки принятия решений, позволяющую прогнозировать обеспечение точности допусков взаимного расположения поверхностей при 3D-печати, рекомендовать варианты базирования моделей деталей в рабочей зоне 3D-принтера на основе анализа его геометрической точности для обеспечения допусков взаимного расположения и, как следствие, снизить вероятность печати бракованных деталей.

Система прошла опытную эксплуатацию в учебном процессе кафедр технологии и оборудования машиностроительного производства учреждения образования «Полоцкий государственный университет» и технологии машиностроения учреждения образования «Витебский государственный технологический университет».

Разработки могут использоваться в проектных бюро предприятий, использующих 3D-принтеры; ИТ-компаниях для создания и совершенствования программ-слайсеров; учебном процессе для подготовки специалистов в области производства изделий на основе трехмерных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология 2D- и 3D-печати, 3D-принтеры / С.О. Никифоров [и др.] // Вестн. Бурят. науч. центра Сибир. отд-ния РАН. – 2016. – № 4(24). – С. 156–163.
2. Полторан, Я.Е. 3D-печать в современной промышленности / Я.Е. Полторан, К.А. Ведищев // Аллея науки. – 2019. – Т. 1, № 7(34). – С. 3–6.

3. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении. Пособие для инженеров / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. – М. : НАМИ, 2015. – 220 с.
4. Савицкий, В.В. Исследование параметров 3D-печати на размерную точность изделий / В.В. Савицкий, А.Н. Голубев, Д.И. Быковский // Вестн. ВГТУ. – 2018. – № 2(35). – С. 52–61.
5. Зверовщиков, А.Е. Исследование точности размеров, обеспечиваемых технологией 3D-печати / А.Е. Зверовщиков, Д.А. Шелахаев, С.А. Нестеров // Изв. высш. учеб. заведений. Поволж. регион. Техн. науки. – 2019. – № 1(49). – С. 66–78.
6. Попов, С.Ю. Программное обеспечение подготовки 3D-моделей к 3D-печати / С.Ю. Попов, А.Н. Зеленина, Н.М. Токарева // Вестн. Воронеж. ин-та высоких технологий. – 2019. – № 2(29). – С. 33–39.
7. Блохин, А.В. Печать трехмерных объектов с использованием оптимальных настроек 3D-принтера / А.В. Блохин, А.А. Сапилова, П. Н. Абашкина // Науч.-практ. исслед. – 2019. – № 8-3(23). – С. 24–28.
8. Абрамов, Ф.Н. О разработке терминологии базирования в машиностроении / Ф.Н. Абрамов // Вестн. машиностроения. – 2006. – № 2. – С. 67–72.
9. Сысоев, Ю.С. Предложение по совершенствованию ГОСТ 21495–76 «Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения» / Ю.С. Сысоев, С.А. Томилин // Вестн. машиностроения. – 2008. – № 1. – С. 48–51.
10. Новоселов, Ю.А. Альтернативная концепция теории базирования в машиностроении / Ю.А. Новоселов // Вестн. машиностроения. – 2009. – № 2. – С. 48–55.
11. Базров, Б.М. Практическое приложение теории базирования в машиностроении / Б.М. Базров // Вестн. машиностроения. – 2017. – № 5. – С. 6–11.
12. Базров, Б.М. Совершенствование основ теории базирования с учетом развития традиционных и аддитивных технологий / Б.М. Базров, М.Л. Хейфец // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 5. – С. 617–623.
13. Практическое приложение теории базирования для синтеза универсально-сборных приспособлений / Н.Н. Попок [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2020. – № 11. – С. 21–31.
14. Научные основы технологии машиностроения : учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1 / Н.В. Беляков [и др.]. – Витебск : ВГТУ, 2021. – 309 с.

REFERENCES

1. Nikiforov, S.O., Marhadaev, B.E., Nikiforov, B.S., & Sholohov, E.S. (2016). Tehnologija 2D- i 3D-pechati, 3D-printery [2D and 3D printing technology, 3D printers]. *Vestnik Buryatskogo nauchnogo centra Sibirskogo otdeleniya RAN [Bulletin of the Buryat Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences]*, 4(24), 156–163. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Poltoran, Y.E., & Vedishchev, K.A. (2019). 3D-pechat' v sovremennoj promyshlennosti [3D-printing in modern industry]. *Alleya nauki [Alley of Science]*, Vol. 1, 7(34), 3–6. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Zlenko, M.A., Nagaytsev, M.V., & Dovbysh, V.M. (2015). *Additivnye tehnologii v mashinostroyenii. Posobie dlja inzhenerov [Additive technologies in mechanical engineering. A guide for engineers]*. Moscow: NAMI. (In Russ.).
4. Savitsky, V.V., Golubev, A.N., & Bykovsky, D.I. (2018). Issledovanie parametrov 3D pechati na razmernuju tochnost' izdelij [Study of 3D printing parameters for dimensional accuracy of products]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta [Vestnik of Vitebsk State Technological University]*, 2(35), 52–61. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Zverovshchikov, A.E., Shelahaev, D.A., & Nesterov, S.A. (2019). Issledovanie tochnosti razmerov, obespechivaemykh tehnologiej 3D-pechati [Examining the Dimensional Accuracy of 3D Printing Technology]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Povolzhskij region. Tekhnicheskie nauki [News of higher educational institutions. Volga region. Technical science]*, 1(49), 66–78. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Popov, S.Y., Zelenina, A.N., & Tokareva, N.M. (2019). Programmnnoe obespechenie podgotovki 3D-modelej k 3D-pechati [Software for preparing 3D models for 3D printing]. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokih tekhnologij [Vestnik of the Voronezh Institute of High Technologies]*, 2(29), 33–39. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Blokhin, A.V., Sapilova, A.A., & Abashkina, P.N. (2019). Pechat' trjohmernyh ob#ektov s ispol'zovaniem optimal'nyh nastroeok 3D-printera [Printing 3D objects using optimal 3D printer settings]. *Nauchno-prakticheskie issledovaniya [Scientific and practical research]*, 8-3(23), 24–28. (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Abramov, F.N. (2006). O razrabotke terminologii bazirovaniya v mashinostroyenii [On the development of basing terminology in mechanical engineering]. *Vestnik mashinostroyeniya [Bulletin of Mechanical Engineering]*, 2, 67–72. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Sysoev, Y.S., & Tomilin, S.A. (2008). Predlozhenie po sovershenstvovaniju GOST 21495–76 «Bazirovanie i bazy v mashinostroyeniii. Terminy i opredeleniya» [Proposal for improvement of GOST 21495–76 «Basing and bases in mechanical engineering. Terms and Definitions»]. *Vestnik mashinostroyeniya [Bulletin of Mechanical Engineering]*, 1, 48–51. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Novoselov, Y.A. (2009). Al'ternativnaja koncepcija teorii bazirovaniya v mashinostroyenii [Alternative concept of basing theory in mechanical engineering]. *Vestnik mashinostroyeniya [Bulletin of Mechanical Engineering]*, 2, 48–55. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Bazrov, B.M. (2017). Prakticheskoe prilozhenie teorii bazirovaniya v mashinostroyenii [Practical application of the theory of basing in mechanical engineering]. *Vestnik mashinostroyeniya [Bulletin of Mechanical Engineering]*, 5, 6–11. (In Russ., abstr. in Engl.).
12. Bazrov, B.M., & Heifetc, M.L. (2020). Sovershenstvovanie osnov teorii bazirovaniya s ucheto razvitiya tradicionnyh i additivnyh tehnologij [Improving the foundations of the theory of basing, taking into account the development of traditional and additive technologies]. *Doklady nacional'noj akademii nauk Belarusi [Report National Academy of Sciences of Belarus]*, Vol. 64, 5, 617–623. (In Russ., abstr. in Engl.).

13. Popok, N.N., Belyakov, N.V., Makharinsky, Y.E., & Latushkin, D.G. (2020). Prakticheskoe prilozhenie teorii bazirovaniya dlja sinteza universal'no-sbornyh prispособlenij [Practical application of the theory of basing for the synthesis of universal prefabricated fixtures]. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta [Herald of Polotsk State University]*, 11, 21–31. (In Russ., abstr. in Engl.).
14. Belyakov, N.V., Gorohov, V.A., Makharinsky, Y.E., & Olshansky, V.I. (2021). *Nauchnye osnovy tehnologii mashinostroenija [Scientific foundations of mechanical engineering technology]*, Vol. 1. Vitebsk: Vitebsk State Technological University. (In Russ.).

Поступила 30.11.2021

DECISION SUPPORT SYSTEM FOR BASING MODELS OF MACHINE PARTS IN THE WORKING AREA OF 3D-PRINTERS

N. POPOK, N. BELYAKOV, D. YASNEV

Based on the formulated concepts of design-based in additive synthesis, a decision support system is proposed for basing (orientation) models of machine parts in the working area of a 3D-printer, the essence of which is to consistently determine and identify possible compositions of surface orientation bases, determine the parameters of geometric accuracy of a 3D-printer, form a basic coordinate system (by superimposing geometric connections on the model) and its binding to the coordinate system of a 3D-printer. With the help of the system, already at the design stage, it is possible to predict the accuracy of the tolerances of the mutual distribution of surfaces during 3D-printing and recommend options for basing models of parts in the working area of the printer based on an analysis of its geometric accuracy to ensure these tolerances. The system can be used in: design bureaus of enterprises using 3D-printers; IT-companies for creating and improving slicer programs; educational process for training specialists in the field of manufacturing products based on three-dimensional technologies.

Keywords: additive technologies, slicer, 3D-printing, 3D-printer, basing, start-up of mutual arrangement, error, geometric accuracy, production preparation, mechanical engineering.

УДК 621.926

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАЛА РОТОРА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ БИСЕРНОЙ МЕЛЬНИЦЫ

канд. техн. наук В.И. КОЗЛОВСКИЙ, канд. техн. наук, доц. О.А. ПЕТРОВ
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

Рассмотрены особенности конструкций горизонтальных бисерных мельниц. Приведены результаты теоретических исследований влияния конструктивных и эксплуатационных параметров на диаметр вала и его отклонения от оси вращения. Построены графические зависимости диаметра вала от расстояния между подшипниками при разных диаметрах и количестве дисков ротора, а также получено общее уравнение для расчета диаметра вала. Представлены результаты расчетов значений отклонений вала в месте установки уплотнения и на консоли. Проведен анализ полученных данных и взаимосвязи между ними, дающий возможность рационального конструирования горизонтальной бисерной мельницы.

Ключевые слова: сверхтонкое диспергирование, технический бисер, бисерная мельница, горизонтальный ротор, прочностные характеристики.

Введение. Бисерные мельницы могут успешно применяться в целом ряде технологий как в промышленности строительных материалов, так и во многих смежных отраслях производства: лакокрасочной, химической, фармацевтической, пищевой и др. [1–4]. Они используются для сверхтонкого диспергирования широкого спектра материалов в жидкой среде за счет перетирания частиц твердыми шариками – техническим бисером.

В зависимости от технологических нужд и эксплуатационных характеристик в качестве материала для изготовления технического бисера используют чистосортное или упрочненное стекло, нержавеющей сталь, фарфор и др. Применяются также соединения, являющиеся основой таких уникальных по своим свойствам материалов, как циркон, корунд, карборунд, победит. А именно: силикат циркония, оксид алюминия, карбид кремния, монокристалл вольфрама. Естественно, что чем прочнее обрабатываемый материал, тем более прочные и твердые мелющие тела следует применять. Но, кроме этого, необходимо учитывать размерные границы требуемой дисперсности, допустимость наличия продуктов износа в готовом материале и др. Диаметр бисера, правильный подбор которого непосредственно влияет на эффективность работы мельницы, обычно составляет 0,3–3 мм. В качестве дисперсионной среды, кроме воды, могут использоваться различные органические растворители, минеральные, синтетические и другие жидкости, отличающиеся своими свойствами.

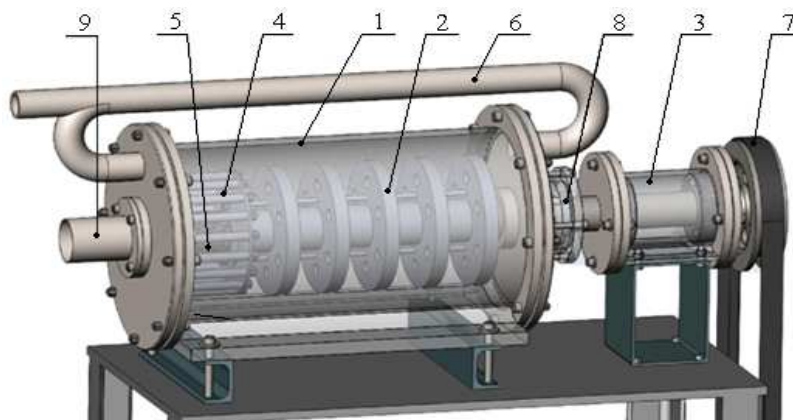
В настоящее время применяются бисерные мельницы двух основных типов: горизонтальные и вертикальные. Наиболее перспективными конструктивно в ряде случаев являются горизонтальные бисерные мельницы (ГБМ), что обусловлено более равномерным распределением нагрузок по длине конструкции. Один из основных элементов ГБМ – вал ротора, от параметров которого зависит производительность и ресурс работы оборудования, т.к. он непосредственно связан со всеми ответственными узлами и деталями. Поэтому правильное конструирование вала и ротора в целом оказывает значительный эффект на работоспособность машины.

Основными параметрами, которые будут оказывать отрицательное воздействие на работоспособность конструкции, являются: 1) величина смещения вала (прогиб) от оси вращения на консоли; 2) величина смещения вала в месте установки уплотнения. Смещения вала приводят к выходу из строя подшипников качения, быстрому износу торцевого уплотнения и нарушению работы динамического сепаратора при его наличии.

Вал ГБМ установлен консольно и относится к быстроходным, поэтому его конструирование начинается с расчета на вибрационную устойчивость, а также жесткость и прочность [5]. В результате чего определяется диаметр вала и величины прогибов в опасных сечениях. Этот расчет достаточно громоздкий и может занимать много времени. Однако в результате проведенных исследований ГБМ нами были получены оптимальные параметры работы данных машин. Их подстановка в предложенную методику расчета значительно упростит подбор оптимального диаметра вала и определение его прогибов в опасных сечениях в зависимости от технологических и геометрических параметров.

Основная часть. Горизонтальная бисерная мельница представляет собой неподвижный цилиндрический корпус, на 80–90% заполненный бисером (рисунок 1). Внутри горизонтально расположенного корпуса 1 вращается ротор 2, состоящий из вала с насаженными на него дисками. В боковой стенке корпуса вмонтирована система уплотнения вала торцевого типа 8.

При вращении ротора с частотой порядка 1000 об/мин начинается интенсивное движение бисера, который, совершая возвратно-поступательные и вращательные перемещения, измельчает частицы материала в результате истирания, раздавливания и соударений. Чем интенсивнее вибрирует бисер и чем медленнее проходит суспензия через мельницу, тем эффективнее измельчаются частицы перерабатываемого материала.



1 – корпус; 2 – ротор; 3 – подшипниковый узел; 4 – динамический сепаратор; 5 – сетчатый фильтр; 6 – входной патрубок; 7 – ременная передача; 8 – торцевое уплотнение; 9 – выходной патрубок

Рисунок 1. – Конструкция горизонтальной бисерной мельницы

Камеры промышленных мельниц выполняются с рубашкой для водяного охлаждения. Внутренняя поверхность корпуса, подвергающаяся износу, может иметь сменную футеровку. Ротор может выполняться гуммированным для предотвращения собственного износа и для уменьшения износа бисера. В корпусе также устанавливаются статический или динамический сепаратор для отделения продукта от бисера. Большинство мельниц могут работать как в непрерывном, так и в циркуляционном режимах.

Основными параметрами при расчете вала ротора ГБМ (рисунок 2), которые будут влиять на его диаметр и прогибы являются: расстояние между подшипниками (L_n), которое варьировалось от 0,15 до 0,5 м; диаметр дисков (D_d) изменялся в диапазоне 0,1–0,3 м и их количество (k) принималось от 5 до 8 шт. Остальные параметры были взяты или рассчитаны из предыдущих исследований ГБМ [1; 2; 6; 7]. Например, частота вращения вала определялась из условия, что оптимальная окружная скорость по кромкам дисков должна быть 10 м/с [6], а расстояние между дисками (L_d) не должно превышать 40 мм [6]. Масса диска рассчитывалась исходя из соотношения значений его диаметра и толщины [1]. Расстояние между подшипниками и торцевым уплотнением (L_y) принималось минимальным – 40 мм, для обеспечения наименьшего прогиба в месте его установки. В качестве измельчаемого материала, как модельная среда, использовался мелкозернистый кварцевый песок. Для расчета мощности затрачиваемой на перемешивание общей массы (шарики, материал и вода) воспользовались формулой [7]

$$N = 0,616\pi\rho_c\omega_d^2r_d^4k\sqrt{v\omega_d}, \quad (1)$$

где ω_d – угловая скорость вращения диска, с^{-1} ;
 ρ_c – плотность среды, кг/м^3 ;
 r_d – радиус диска, м;
 v – кинематическая вязкость среды, $\text{м}^2/\text{с}$.

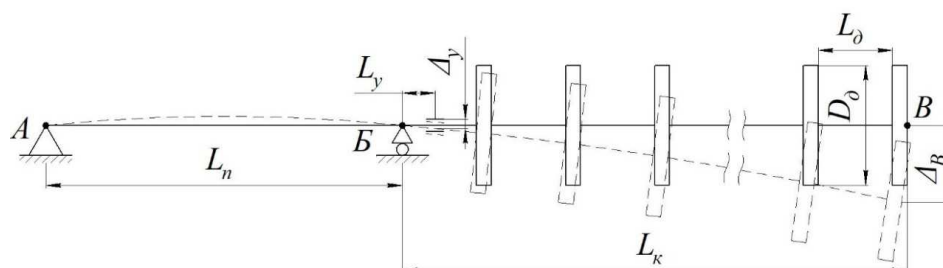


Рисунок 2. – Расчетная схема вала ротора

Согласно методике расчета, на первом этапе определялся диаметр вала (d_0) и проводилась его проверка на условие виброустойчивости:

$$\frac{\omega}{\omega_{кр}} \leq 0,7, \quad (2)$$

где ω – угловая скорость вращения вала, с^{-1} ;

$\omega_{кр}$ – критическая угловая скорость вращения вала, с^{-1} .

Второй этап заключался в определении прогибов вала в месте установки торцевого уплотнения на консоли.

На третьем этапе определялись изгибающие и крутящие моменты и проводилась проверка вала на прочность.

В результате проведенных расчетов были получены графические зависимости диаметра вала от расстояния между подшипниками при разных диаметрах и количестве дисков (рисунок 3).

Из графиков видно, что при минимально принятом к расчетам количестве дисков 5 шт. и наименьшем их диаметре 0,1 м диаметр вала ротора в зависимости от расстояния между подшипниками ($0,15 \text{ м} \leq L_n \leq 0,5 \text{ м}$) варьируется от 16,5 до 21,5 мм. При максимальном количестве дисков 8 шт. и наибольшем их диаметре 0,3 м величина диаметра вала ротора оказывается в диапазоне 34,5 до 40,5 мм.

Увеличение диаметра дисков от 0,1 м до 0,3 м приводит соответственно к возрастанию диаметра вала ротора на 6–8 мм, т.к. увеличивается его масса. При увеличении количества дисков от 5 до 8 – диаметр возрастает на 8–10 мм, т.к. удлиняется консоль вала. При увеличении расстояния между подшипниками с 0,15 м до 0,267 м диаметр вала увеличивается на 2,5–4 мм, а с 0,267 м до 0,5 м – на 2–2,5 мм.

Анализ приведенных данных позволил получить общее уравнение зависимости диаметра вала от расстояния между подшипниками для различного количества и диаметров дисков, которое можно записать в виде

$$d_a = k_1 L_n^3 - k_2 L_n^2 + k_3 L_n + k_4 \quad (\text{при } 0,15 \text{ м} \leq L_n \leq 0,5 \text{ м}), \quad (3)$$

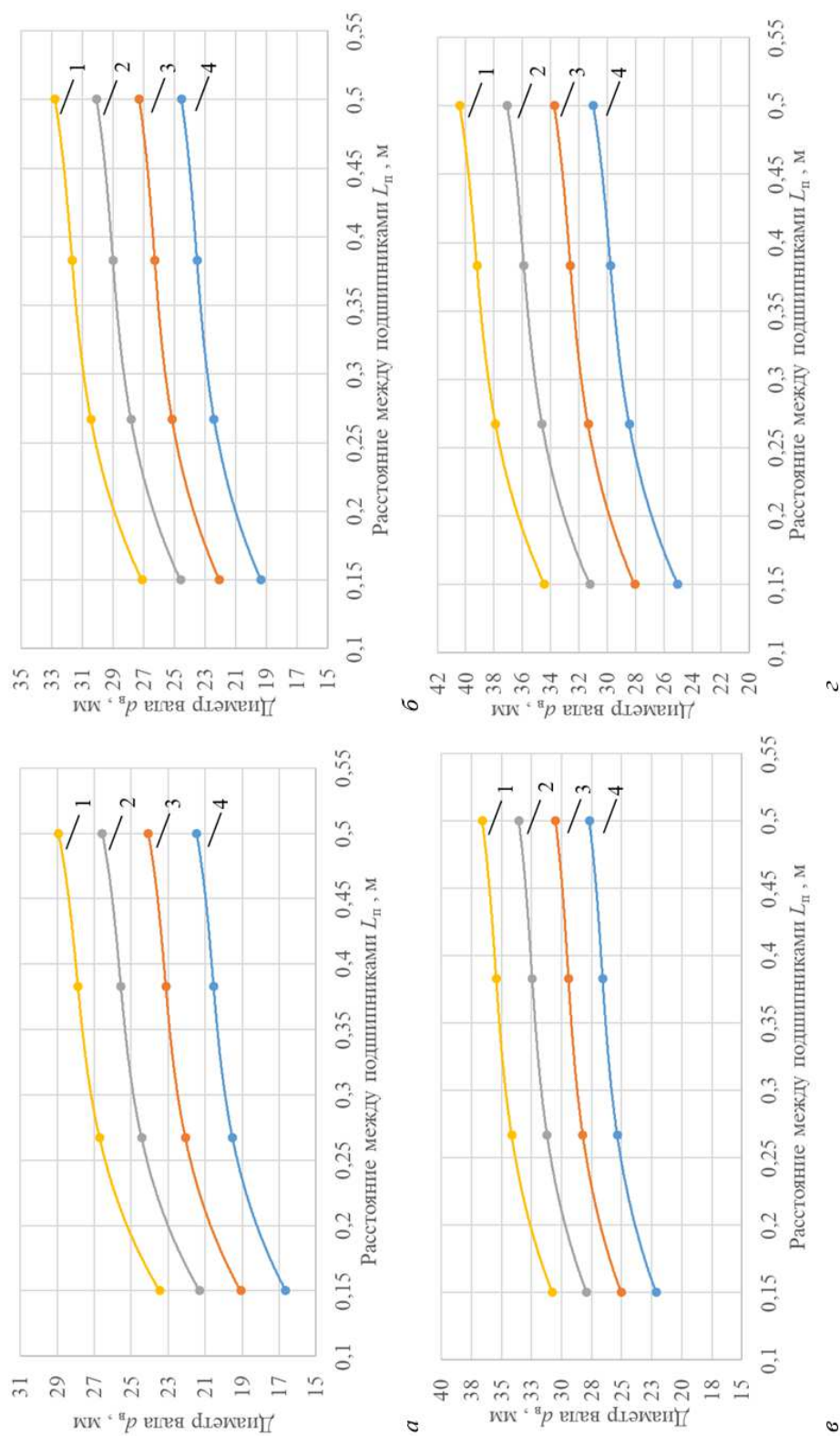
где k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты (таблица 1).

Таблица 1. – Значения коэффициентов для уравнения (3)

			Диаметр дисков D_d , м			
			0,1	0,17	0,23	0,3
Количество дисков k , шт	5	k_1	202,99	197,11	188,4	181,78
		k_2	238,21	231,37	221,16	213,27
		k_3	99,92	96,906	92,539	89,24
		k_4	13,155	11,313	9,5482	7,4404
	6	k_1	205,16	199,96	192,5	190,1
		k_2	240,58	234,54	225,81	222,83
		k_3	101,25	98,573	94,818	93,601
		k_4	16,649	14,419	12,262	9,6745
	7	k_1	207,15	202,62	196,57	199,11
		k_2	242,72	237,48	230,39	233,17
		k_3	102,44	100,1	97,033	98,265
		k_4	20,17	17,557	15,015	11,97
	8	k_1	209,08	205,25	200,75	208,99
		k_2	244,78	240,38	235,11	244,5
		k_3	103,55	101,56	99,273	103,33
		k_4	23,715	20,724	17,807	14,334

Таблица 2. – Значения прогибов в месте установки уплотнения (Δ_y) и на консоли вала (Δ_s)

Диаметр дисков D_d , м	Расстояние между подшипниками L_n , м	Количество дисков k , шт.							
		5		6		7		8	
		Δ_y , мм	Δ_s , мм	Δ_y , мм	Δ_s , мм	Δ_y , мм	Δ_s , мм	Δ_y , мм	Δ_s , мм
0,1	0,15	0,4621	2,1748	0,4483	2,4717	0,4222	2,5585	0,4372	3,1919
	0,267	0,0820	0,2823	0,0693	0,2581	0,0692	0,2940	0,0661	0,3017
	0,383	0,0689	0,2082	0,0689	0,2391	0,0629	0,2459	0,0584	0,2366
	0,5	0,0689	0,1703	0,0629	0,1932	0,0606	0,2199	0,0585	0,2291
0,17	0,15	0,4435	2,1844	0,4157	2,2948	0,4290	2,8901	0,4122	3,0417
	0,267	0,0687	0,2329	0,0724	0,3004	0,0652	0,2800	0,0658	0,3482
	0,383	0,0675	0,2140	0,0613	0,2204	0,0651	0,2822	0,0579	0,2647
	0,5	0,0620	0,1759	0,0593	0,1994	0,0568	0,2071	0,0601	0,2579
0,23	0,15	0,4757	2,6969	0,4608	3,0880	0,4523	3,5308	0,4272	3,6132
	0,267	0,0811	0,3339	0,0757	0,3493	0,0674	0,3464	0,0643	0,3554
	0,383	0,0743	0,2656	0,0658	0,2685	0,0602	0,2578	0,0568	0,2706
	0,5	0,0627	0,1889	0,0574	0,1984	0,0607	0,2505	0,0563	0,2609
0,3	0,15	0,4730	2,9300	0,4640	3,4523	0,4343	3,5617	0,4341	4,1611
	0,267	0,0697	0,2747	0,0722	0,3459	0,0659	0,3587	0,0637	0,3787
	0,383	0,0664	0,2520	0,0632	0,2684	0,0633	0,3297	0,0610	0,3459
	0,5	0,0682	0,2313	0,0615	0,2430	0,0570	0,2578	0,0557	0,2761



Диаметр дисков: 1 – 0,3 м; 2 – 0,23 м; 3 – 0,17 м; 4 – 0,1 м.
Количество дисков: а – 5; б – 6; в – 7; г – 8

Рисунок 3. – Зависимости диаметра вала от расстояния между подшипниками

Кроме того, в результате расчетов были получены значения отклонений (прогибов вала) в месте установки уплотнения (Δ_y) и на консоли вала (Δ_e) в зависимости от расстояния между подшипниками при различных диаметрах и количестве дисков (см. таблица 2).

В результате анализа можно отметить, что значения отклонений Δ_e возрастают с увеличением количества дисков. Однако на эти отклонения значительное влияние оказывает расстояния между подшипниками. Так, например, при количестве дисков 5 шт. и расстоянии между подшипниками 0,15 м отклонение на консоли составляет 2,1748 мм, а при дальнейшем увеличении расстояния до 0,267 м это значение резко снижается до 0,2823 мм. Последующее возрастание расстояния между подшипниками не приводит к существенному изменению прогиба вала на консоли. Аналогичная картина наблюдается для всех полученных данных.

Что касается прогиба вала в месте установки торцевого уплотнения Δ_y , то здесь также наблюдается значительное уменьшение прогиба при изменении расстояния между подшипниками от 0,15 м до 0,267 м. Однако значение Δ_y с увеличением длины консоли, диаметров дисков и расстояния между подшипниками не всегда уменьшалось или увеличивалось, иногда оно меняется скачкообразно. Это объясняется тем, что в предыдущих расчетах для каждого случая был получен свой диаметр вала. Т.е. имели место случаи, когда при увеличении длины консоли вала его диаметр тоже увеличивался. Соответственно, прогиб Δ_y мог быть равен или меньше, чем у вала с меньшей консолью и диаметром.

Полученные значения Δ_y также позволяют подобрать торцевое уплотнение для данного вида мельниц. Здесь можно отметить, что при расстоянии между подшипниками 0,15 м отклонения превышают допустимое значение 0,1 мм [5]. Это приводит к установке нестандартного торцевого уплотнения и повышению стоимости мельницы. Но при увеличении расстояния между подшипниками до 0,267 м отклонения в месте установки уплотнения значительно снижаются и не превышают допустимых значений.

Заключение. Очевидно, что возрастание диаметра дисков повышает массу ротора, а их количество – увеличивает длину консоли, что ведет к увеличению диаметра вала ротора горизонтальной бисерной мельницы и влияет на прогибы вала на конце консоли и в месте установки уплотнения. Изменение расстояния между подшипниками в месте установки консольного вала увеличивает его диаметр в меньшей степени, но значительно влияет на величину прогибов. Отклонения вала от оси вращения приводят к дополнительной вибрации, биению, неправильной работе и в итоге к преждевременному выходу из строя подшипников качения и элементов довольно дорогостоящего торцевого уплотнения. Используя полученные по предлагаемой методике результаты расчетов и приведенные зависимости, можно связать основные параметры горизонтальной бисерной мельницы для правильного подбора торцевого уплотнения и для ее рационального конструирования в целом.

В дальнейшем планируется продолжить исследования в направлении усовершенствования конструкций, повышения надежности и ресурса работы рассматриваемого вида оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Индейкин, Е.А. Пигментирование лакокрасочных материалов / Е.А. Индейкин, Л.Н. Лейбзон, И.А. Толмачев. – Л.: Химия, 1986. – 160 с.
2. Масунов, Е.Б. Преимущество различных типов отечественного диспергирующего оборудования с мелющими телами / Е.Б. Масунов // Хим. и нефтяное машиностроение. – 1983. – № 2. – С. 37–39.
3. Козловский, В.И. Комплексная технология диспергирования меловых наполнителей композитов мокрым способом / В.И. Козловский, О.А. Петров, Д.Н. Боровский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2020. – № 8. – С. 71–75.
4. Витязь, П.А. Высокие технологии и наноматериалы в строительной индустрии / П.А. Витязь, В.Г. Горобцов // Стр. наука и техника. – 2009. – № 6. – С. 4–16.
5. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств (примеры и задачи): учеб. пособие / М.Ф. Михалев [и др.]; под общ. ред. М.Ф. Михалева. – Л.: Машиностроение, 1984. – 304 с.
6. Козловский, В.И. Влияние конструктивных особенностей шаровой мельницы с мешалкой на ее эффективность / В.И. Козловский, П.Е. Вайтехович // Лакокрасоч. материалы и их применение. – 2015. – № 7. – С. 43–45.
7. Козловский, В.И. Определение энергозатрат на вращение рабочего органа шаровой мельницы с мешалкой / В.И. Козловский, П.Е. Вайтехович // Хим. и нефтегазовое машиностроение. – 2016. – № 5-6. – С. 14–17.

REFERENCES

1. Indejkin, E.A., Lejbzon, L.N., & Tolmachev, I.A. (1986). *Pigmentirovanie lakokrasochnykh materialov* [Pigmentation of paints and varnishes]. Leningrad: Himiya. (In Russ.).
2. Masunov, E.B. (1983). *Preimushchestvo razlichnykh tipov otechestvennogo dispergiruyushchego oborudovaniya s melyushchimi telami* [The advantage of various types of domestic dispersing equipment with grinding media]. *Himicheskoe i neftyanoe mashinostroyeniye* [Chemical and Petroleum engineering], 2, 37–39. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Kozlovskij, V.I., Petrov, O.A., & Borovskij, D.N. (2020). *Kompleksnaya tekhnologiya dispergirovaniya melovykh napolnitelej kompozitov mokrym sposobom* [Integrated technology for dispersing chalk fillers of composites using a wet method]. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta* [Herald of Polotsk State University], 8, 71–75. (In Russ., abstr. in Engl.).

4. Vityaz', P.A., & Gorobcov, V.G. (2009). Vysokie tekhnologii i nanomaterialy v stroitel'noj industrii [High technologies and nanomaterials in the construction industry]. *Stroitel'naya nauka i tekhnika* [Building science and Technology], 6, 4–16. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Mihalev, M.F., Tret'yakov, N.P., Mil'chenko, A.I., & Sobnin, V.V. (1984). *Raschet i konstruirovaniye mashin i apparatov himicheskikh proizvodstv (primery i zadachi)* [Calculation and design of machines and apparatus for chemical production (examples and tasks)]. Leningrad: Mashinostroenie.
6. Kozlovskij, V.I., & Vajtekovich, P.E. (2015). Vliyanie konstruktivnykh osobennostey sharovoj mel'nicy s meshalkoj na ee effektivnost' [Influence of design features of a ball mill with a stirrer on its efficiency]. *Lakokrasochnye materialy i ih primeneniye* [Paints and Varnishes and their application], 7, 43–45. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Kozlovskij, V.I., & Vajtekovich, P.E. (2016). Opredeleniye energozatrat na vrashcheniye rabocheho organa sharovoj mel'nicy s meshalkoj [Determination of energy consumption for the rotation of the working body of a ball mill with a stirrer]. *Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie* [Chemical and Oil and Gas engineering], 5-6, 14–17. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 26.11.2021

**INFLUENCE OF DESIGN AND OPERATIONAL PARAMETERS
ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF THE ROTOR SHAFT
OF A HORIZONTAL BEAD MILL**

V. KOZLOVSKI, O. PETROV

The article considers the design features of horizontal bead mills, presents the results of theoretical studies of the influence of design and operational parameters on the shaft diameter and its deviation from the axis of rotation. Graphical dependences of the shaft diameter on the distance between the bearings for different diameters and the number of rotor disks are constructed, and a general equation for calculating the shaft diameter is obtained. The results of calculations of the values of shaft deviations at the installation site of the seal and on the console are presented. The analysis of the obtained data and the relationship between them, which makes it possible to rationally design a horizontal bead mill, is carried out.

Keywords: ultrafine dispersion, technical beads, bead mill, horizontal rotor, strength characteristics.

УДК 621.785.545

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ДИФФУЗИОННОГО НАСЫЩЕНИЯ ПРОВОЛОЧНОГО МАТЕРИАЛА

М.В. СЕМЕНЧЕНКО*(Полоцкий государственный университет)*

Предложена установка для диффузионного насыщения проволоки путем непосредственного пропуска электрического тока через изделие в режиме термоциклирования по маятниковой схеме. Оборудование позволяет вести обработку путем непрерывной и ступенчатой подачи проволоки. Возможна термическая обработка проволоки, ранее подвергнутой диффузионному насыщению, в печи для перераспределения легирующих элементов и улучшения качества поверхностного слоя. Замещение пары тиристор–компаратор твердотельным реле позволило заменить аналоговый сигнал цифровым. Кроме того, стало возможным возможным насыщение проволоки с диаметром менее 1 мм с точностью выставления продолжительности нагрева и охлаждения до 0,01 с при максимальной силе тока, пропускаемого через обрабатываемый проволочный материал, 100 А. Ранее минимальная продолжительность нагрева составляла 1 с при максимальной силе тока 30 А. Предусмотрена возможность контроля физических параметров процесса диффузионного насыщения проволоки, проволочных материалов.

Ключевые слова: установка, проволока, диффузионное насыщение, термоциклирование, пропускание электрического тока, порошковая среда.

Введение. Для формирования защитных покрытий производители предлагают широкую номенклатуру материалов. Это позволяет подобрать проволоку с подходящим химическим составом для обработки поверхности, работающей в заданных условиях. Сопротивляемость внешнему воздействию и долговечность формируемого слоя зависят от количества легирующих элементов и соблюдения технологии нанесения защитного слоя. Стоимость высоколегированного материала делает экономически невыгодным упрочнение или восстановление дешевых малоресурсных деталей. В сложившихся экономических условиях многие руководители сознательно отказываются от закупки различных марок проволоки, т.к. у предприятий нет экономической возможности для приобретения большого количества расходных материалов либо они считают такой подход нерациональным расходом средств.

В качестве альтернативного варианта может выступать закупка дешевой углеродистой проволоки с ее последующим диффузионным насыщением необходимыми легирующими элементами. Добиться этого можно путем подбора состава насыщающей смеси и режимов термического воздействия¹.

Использование печного нагрева представляется трудоемким и неэффективным. Располагая необходимым оборудованием, предприятие должно изготовить специальные контейнеры², конструктивное исполнение которых разрешает добиться равномерного распределения легирующих элементов в поверхностном слое в продольном и поперечном направлении. Однако их использование позволит изготовить проволоку ограниченной длины, что в некоторых случаях усложняет процесс формирования защитного покрытия и ограничивает возможную область использования легированного материала. Кроме того, налипание частиц насыщающей среды ухудшает качество поверхностного слоя и усложняет процесс формирования защитного покрытия на детали. Требуется последующая термическая обработка для перераспределения легирующих элементов по объему проволочного материала и снижения вероятности скалывания сформированного слоя.

Подобного недостатка лишен способ диффузионного насыщения проволоки путем непосредственного пропуска электрического тока через проволочный материал в режиме термоциклирования³ [1; 2]. Способ обеспечивает диффузионное насыщение поверхностного слоя проволоки различных длины и диаметра, позволяя изготовить материал с низким градиентом легирующего элемента по поперечному сечению, но достаточной концентрации.

Основная часть. Нами проводилось диффузионное насыщение проволоки Св 08Г2С ГОСТ 2246-80 диаметром 1,2 мм бором, титаном и алюминием [3]. Диффузионное насыщение проволоки бором осуществляли в порошке ферробора ФБ 17 (17% В) ГОСТ 14848-69 и смеси, состоящей из 99% В4С + 1% NaF, титаном –

¹ Boride hard-facing : pat. US 4172162, C23F 7/00 / Ronald H. Smith. – Publ. date Oct. 23, 1979.

² Контейнер для химико-термической обработки проволоки : полез. модель РБ 695В 21F 21/00 / В.М. Константинов, А.С. Губанов, Ф.И. Пантелеев, М.В. Семенченко. – Оpubл. 30.12.02.

³ Способ диффузионного насыщения стальной проволоки : пат. № 13370 МПК (2009) С 23С 8/00, С 23С 10/00, С 23Д 1/34 / В.М. Константинов, М.В. Семенченко, В.Г. Дашкевич, А.С. Губанов. – Оpubл. 30.06.2010.

в порошке ферротитана ФТи 35 (35% Ti) ГОСТ 4761-91, алюминием – в смеси, состоящей из оксида алюминия (Al_2O_3) и чистого алюминия (Al). Электрический ток пропускали через проволоку циклически с длительностью импульса 1–10 с и длительностью паузы 1–3 с. Обработка производилась по маятниковой схеме, исключающей выдержку обрабатываемого проволоочного материала при максимальной и минимальной температурах. Нагрев и охлаждение выполнялись непрерывно в течение заданного временного интервала.

Для реализации способа электротермической обработки проволоки путем непосредственного пропускания электрического тока в режиме термоциклирования нами разработана специальная установка⁴ (рисунок 1).

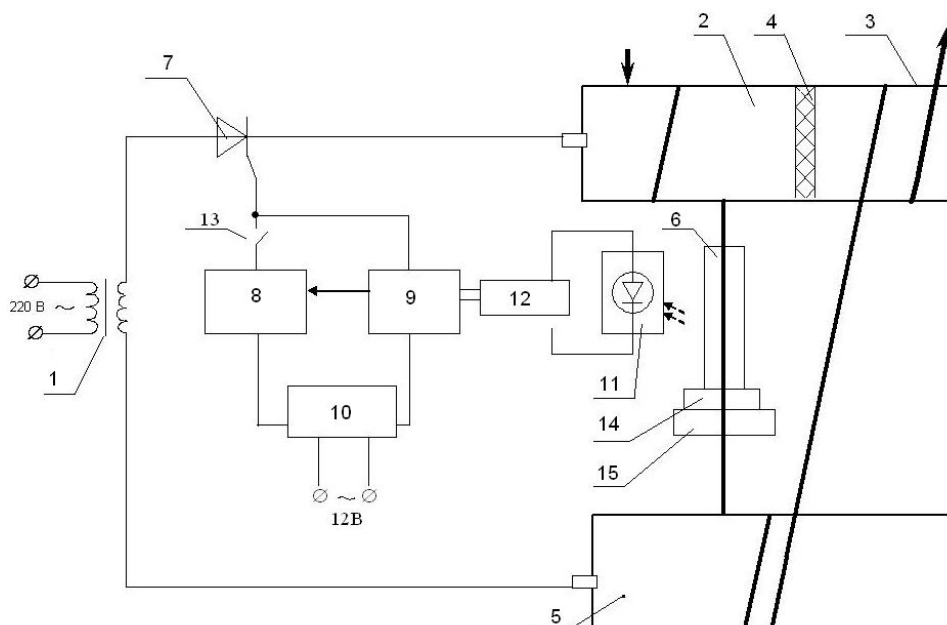


Рисунок 1. – Установка для диффузионного насыщения проволоки

Установка содержит трансформатор 1, верхний электроконтактный цилиндр 2 с частью 3, электрически изолированной с помощью диэлектрической прокладки 4, нижний электроконтактный цилиндр 5, трубку для защитного газа (насыщающей среды) 6, регулятор (тиристор) 7, формирователь управляющих импульсов 8, двухуровневый компаратор 9, источник питания 10, оптический пирометр 11, усилитель 12, переключатель 13, узел охлаждения 14, узел сушки 15.

Установка позволяет проводить непрерывную термическую обработку и диффузионное насыщение проволоки с поддержанием температуры материала в заданных пределах двухуровневым компаратором 9 при разомкнутом переключателе 13 и вести обработку в режиме термоциклирования при замкнутом переключателе 13. Формирователь управляющих импульсов 8, отправляя команды двухуровневому компаратору 9, позволяет поддерживать температуру в заданных пределах.

Порядок работы установки следующий: от разматочного механизма (на схеме не показан) проволока, движущаяся непрерывно с постоянной скоростью, выбираемой с учетом требуемой концентрации легирующего элемента, многократно поступает на верхний электроконтактный цилиндр 2. С верхнего электроконтактного цилиндра 2 проволока проходит через трубку для защитного газа (насыщающую среду) 6, узел охлаждения 14, узел сушки 15 и снова многократно поступает на нижний электроконтактный цилиндр 5. Напряжение на электроконтактные цилиндры подается от трансформатора 1. Далее проволока по восходящей ветви поступает на часть 3 верхнего электроконтактного цилиндра 2, электрически изолированную от остальной его части диэлектрической прокладкой 4, и на приемник (на схеме не показан). Температура в обрабатываемом изделии фиксируется оптическим пирометром 11, соединенным через усилитель 12 с двухуровневым компаратором 9, который (при разомкнутом переключателе 13) через регулятор 7 поддерживает температуру проволоки в заданных пределах.

Термоциклическая обработка проволоки обеспечивается формирователем управляющих импульсов 8 (задает амплитуду, продолжительность импульса, паузу между импульсами), соединенным с регулятором 7, который подключен к трансформатору 1 и верхнему электроконтактному цилиндру 2, и двухуровневым компа-

⁴ Установка для электротермической обработки проволоки : полез. модель № 696 МПК 7 C21D 1/40 / В.М. Константинов, А.С. Губанов, С.Н. Абраменко, М.В. Семенченко. – Опубл. 30.12.02.

ратором 9, поддерживающим температуру в заданных пределах. В этом режиме (переключатель 13 замкнут) двухуровневый компаратор увеличивает продолжительность паузы формирователя управляющих импульсов при повышении температуры проволоки выше заданного максимального предела и продолжительность импульса при понижении температуры ниже заданного минимального предела.

Обеспечивая непрерывную обработку, предложенная установка не подходит для диффузионного насыщения отжига проволоочного материала с высоким градиентом легирующего элемента по поперечному сечению из-за необходимости наматывания проволоки на электроконтактные цилиндры. Наблюдалось скалывание диффузионного слоя, приводящее к уменьшению концентрации легирующего элемента в формируемом покрытии.

Устранить подобный недостаток позволила лабораторная установка для диффузионного насыщения проволоки (рисунок 2) путем непосредственного пропускания электрического тока через проволоочный материал в режиме термоциклирования, состоящая из трансформатора 1, контейнера с насыщающей смесью 2, токопроводящих роликов 3, блока управляющих импульсов 4, включающего компаратор, регулятора 5 (тиристора).

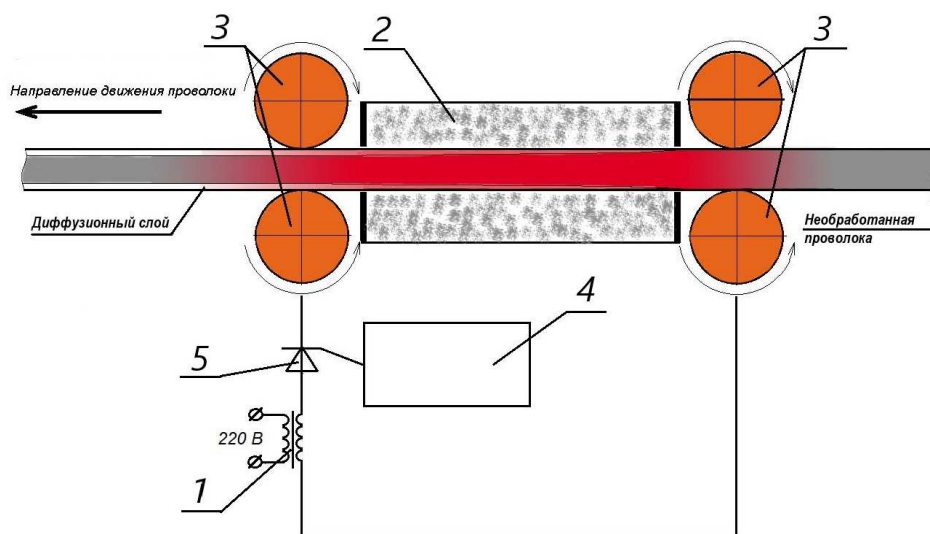


Рисунок 2. – Схема лабораторной установки для диффузионного насыщения проволоки

Работает установка следующим образом: необработанная проволока проходит контейнер 2 с насыщающей смесью со скоростью до 0,1 м/мин. К токопроводящим роликам 3 подается электрический ток от трансформатора 1. Блок управляющих импульсов 4 через регулятор 5 обеспечивает реализацию режима термоциклирования. Электрический ток пропускают через проволоку циклически с длительностью импульса (нагрева) 1–10 с и длительностью паузы (охлаждения) 1–3 с. Сила тока меняется от 15 до 30 А, напряжение составляет 16,8 В. Мгновенное значение температуры контролировалось с помощью оптического пирометра.

Установка позволила реализовать режим ступенчатого и непрерывного диффузионного насыщения поверхностного слоя обрабатываемого материала. В первом случае подача проволоки в зону обработки производилась через заданный отрезок времени (время обработки) на длину обработки (нагрева), равную расстоянию между токопроводящими роликами 3. Во втором – непрерывно с постоянной скоростью, выбираемой с учетом требуемой продолжительности воздействия на каждый микрообъем обрабатываемого проволоочного материала.

Проведенные исследования показали, что из-за возможности регулирования продолжительности нагрева в пределах 1–10 с и охлаждения 1–3 с затруднен подбор режима термического воздействия для проволоки диаметром менее 1 мм. При продолжительности импульса от 1 с проволока перегорала, не позволяя произвести термическую обработку или диффузионное насыщение поверхностного слоя для получения заданной концентрации легирующего элемента. Для снижения уровня энергетического воздействия приходилось увеличивать длину обрабатываемого участка и, следовательно, продолжительность обработки каждого микрообъема материала или скорость подачи для уменьшения продолжительности оказываемого термического воздействия.

Нами предложена установка (рисунок 3), позволяющая реализовать диффузионное насыщение проволоки с диаметром менее 1 мм путем непосредственного пропускания тока через изделия в режиме термоциклирования с продолжительностью нагрева или охлаждения менее 1 с. Она состоит из силового трансформатора 1, устройства контроля физических параметров 2, твердотельного реле 3, контроллера 4, источника питания на 12 В 5, токоподводящих роликов 6, контейнера с насыщающей смесью 7.

Работает установка следующим образом: необработанная проволока проходит контейнер 7 с насыщающей смесью со скоростью до 10 м/мин. Силовой трансформатор 1, работающий от сети 220 В, обеспечивает подачу переменного тока на токоподводящие ролики 6. Контроллер 4 работает от источника питания 5 с напряжением 12 В. Параметры проходящего через опытный образец электрического тока контролируются с помощью устройства контроля физических параметров 2. Силовой трансформатор связан с твердотельным реле 3. Контроллер, работающий от источника питания 5, позволяет задать время нагрева и охлаждения образца во время обработки. Электрический ток пропускают через проволоку циклически с длительностью импульса и длительностью паузы от 0,01 до 999 с. Продолжительность нагрева или охлаждения выбирается в зависимости от диаметра проволоочного материала и требуемого уровня термического воздействия. Режим термического воздействия и охлаждения задается пользователем на электронном табло. Максимальная сила тока нагрузки может достигать 100 А, что позволяет увеличить диаметр обрабатываемого проволоочного материала. Значение управляющего напряжения 3–32 В.

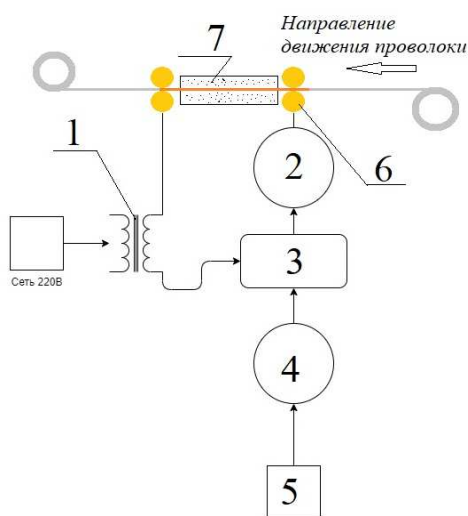


Рисунок. 3. – Схема лабораторной установки для диффузионного насыщения проволоки с диаметром менее 1 мм

При поступлении управляющего сигнала от контроллера 4 твердотельное реле 3 разрывает цепь. Испытуемый образец охлаждается. После завершения заданного времени охлаждения контроллер 4 отправляет сигнал на твердотельное реле 3. Цепь замыкается. Испытуемый образец начинает нагреваться. Цикл обработки повторяется.

Результаты и их обсуждение. Предложенные установки для диффузионного насыщения проволоочного материала путем непосредственного пропускания электрического тока в режиме термоциклирования могут использоваться для изготовления относительно недорогой проволоки по сравнению со сложнелегированным проволоочным материалом. Лабораторные установки не ограничивают длину обрабатываемого проволоочного материала. Позволяют производить диффузионное насыщение и отжиг проволоки путем ступенчатой и непрерывной подачи проволоки в зону обработки. Становится возможным непосредственное насыщение поверхностного слоя из порошковой среды и отжиг проволоки, подвергнутой диффузионному насыщению в специальном контейнере в условиях печного нагрева.

Замена пары компаратор–тиристор (см. рисунок 2) твердотельным реле (см. рисунок 3) повысило точность оказываемого температурного воздействия за счет более высокой скорости переключения между режимами нагрева и охлаждения. Вместо аналогового сигнала используется цифровой. Устройство контроля физических параметров позволяет контролировать силу тока, проходящего через обрабатываемый проволоочный материал. Полученная экономно-легированная проволока может использоваться не только как присадочный материал при формировании защитного покрытия, но и как готовое изделие. Уменьшение продолжительности термического воздействия на время менее 1 с позволило произвести обработку проволоки диаметром 0,8 мм.

Заключение. Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- разработанная ранее установка для электротермической обработки проволоки может использоваться для изготовления экономно-легированной проволоки, подходящей для восстановления или упрочнения дешевых малоресурсных деталей;
- лабораторная установка допускает обработку с длительностью импульса 1–10 с и длительностью паузы 1–3 с. Сила тока меняется от 15 до 30 А, напряжение составляет 16,8 В. Позволяет реализовать непрерывную и ступенчатую подачу проволоочного материала в зону обработки;

– предложена новая лабораторная установка, в которой пара тиристор–компаратор заменена твердотельным реле для использования цифрового сигнала вместо аналогового, с диапазоном коммутируемых напряжений 24–380 В, управляющих напряжений 3–32 В, максимальной силой тока 100 А. Длительность импульса и паузы задается из интервала 0,01–999 с. Это делает возможным обработку проволоки с диаметром менее 1 мм без риска перегорания обрабатываемого проволочного материала или формирования диффузионного слоя с недостаточной концентрацией легирующего элемента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семенченко, М.В. Диффузионное насыщение стальной проволоки в условиях электроконтактного нагрева в режиме термоциклирования / М.В. Семенченко // Тенденции развития науки и образования. – 2017. – № 32-4. – С. 60–61.
2. Семенченко, М.В. Электроконтактный нагрев в режиме термоциклирования – перспективный способ получения экономно-легированной проволоки [Электронный ресурс] / М.В. Семенченко // Инновационные технологии в машиностроении : электрон. сб. материалов междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 21–22 апр. 2020 г. / Полоц. гос. ун-т ; под. ред. чл.-корр. НАН Беларуси, д-ра техн. наук, проф. В.К. Шелега, д-ра техн. наук, проф. Н.Н. Попок. – Новополоцк, 2018. – С. 121–124.
3. Семенченко, М.В. Технологические особенности электроконтактной обработки в режиме термоциклирования / М.В. Семенченко // Инновационные технологии в машиностроении : материалы междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 28–29 окт. 2015 г. / Полоц. гос. ун-т ; под. общ. ред. акад., д-ра техн. наук, проф. А.И. Гордиенко, чл.-корр., д-ра техн. наук, проф. В.К. Шелега. – Новополоцк, 2015. – С. 181–183.

REFERENCES

1. Semenchenko, M.V. (2017). Diffuzionnoe nasyshtchenie stal'noj provoloki v usloviyah elektrokontaktного нагрева v rezhime termociklirovaniya [Diffusion saturation of steel wire under conditions of electric contact heating in the thermal cycling mode]. *Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in the development of science and education], 32-4, 60–61. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Semenchenko, M.V. (2020). Elektrokontaktnyj nagrev v rezhime termociklovaniya – perspektivnyj sposob polucheniya ekonomno-legirovannoj pro-voloki [Electrocontact heating in the thermal cycling mode is a promising way to obtain economically alloyed wire]. *Innovacionnye tekhnologii v mashinostroenii* [Innovative technologies in mechanical engineering] (121–124). Novopolock: Polockij gosudarstvennyj universitet. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Semenchenko, M.V. (2015). Tekhnologicheskie osobennosti elektrokontaktной obrabotki v rezhime termociklirovaniya [Technological features of electrocontact processing in the thermal cycling mode]. *Innovacionnye tekhnologii v mashinostroenii* [Innovative technologies in mechanical engineering] (181–183). Novopolock: Polockij gosudarstvennyj universitet. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 17.12.2021

IMPROVEMENT OF EQUIPMENT FOR DIFFUSIVE SATURATION
OF WIRE MATERIAL

M. SEMENCHENKO

Educational Institution “Polotsk State University” An installation for diffusive saturation of the wire by direct transmission of electric current through the product in the mode of thermal cycling according to the pendulum scheme is proposed. The equipment allows processing by continuous and stepped wire feed. It is possible to heat treat the wire previously subjected to diffusion saturation in a furnace to redistribute the alloying elements and improve the quality of the surface layer. Replacing a thyristor-comparator pair with a solid-state relay made it possible to replace the analog signal with a digital one. Made it possible to saturate a wire with a diameter of less than 1 mm with an accuracy of setting the duration of heating and cooling up to 0.01 seconds at a maximum strength of current passed through the processed wire material, 100 A. Previously, the minimum heating duration was 1 second, and the maximum force current 30 A. The possibility of controlling the physical parameters of the process of diffusion saturation of the wire of wire materials is provided.

Keywords: installation, wire, diffusion saturation, thermal cycling, electric current transmission, powder medium.

УДК 669.018.95

**ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА
БИОРАЗЛАГАЕМЫХ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК**

*д-р техн. наук, проф. В.И. ЖОРНИК, А.В. ЗАПОЛЬСКИЙ, канд. техн. наук А.В. ИВАХНИК
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск),
канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН
(Полоцкий государственный университет)*

Показано, что биоразлагаемые пластичные смазочные материалы (БПСМ) целесообразно создавать на базе смеси растительных и минеральных масел (смешанная дисперсионная среда) с выбором определенного соотношения между их содержанием, а также с использованием одинарных или гетерогенных дисперсных фаз, исходя из заданного уровня работоспособности смазки (реологических и трибологических свойств) и требуемой скоротечности процесса биодеструкции продукта. При этом технологический цикл получения смазки должен обеспечивать минимальное воздействие высоких температур и воды на растительный компонент дисперсионной среды. С целью реализации этого подхода применен способ получения биоразлагаемых мыльных пластичных смазок, в котором щелочной компонент вводится в реакционную массу не в виде традиционно используемого водного раствора, а в составе масляной суспензии. Данный технологический прием проиллюстрирован на примере технологий получения БПСМ на кальциевом (смазка СОЛИДОЛ БИО), литий-кальциевом (смазка OIMOL LC BIO) и комплексном сульфат кальциевом (смазка OIMOL KSC BIO) загустителях. Реологические и трибологические свойства разработанных БПСМ находятся на уровне их аналогов, изготовленных на базе минерального масла, при биоразлагаемости БПСМ примерно в 5,5 раза выше. Разработано и изготовлено технологическое оборудование лабораторного (мощность 10 кг/цикл) и промышленного (мощность 200 и 2500 кг/цикл) типа. Отличительной особенностью данного оборудования является наличие в нем подсоединенного к циркуляционному контуру по системе байпас диспергирующего контура с гидродинамическим диспергатором, реализующим эффект кавитации с возможностью диспергирования компонентов реакционной массы до наноразмерного уровня. Организован промышленный выпуск БПСМ на загустителях различного вида (кальциевый, литий-кальциевый, комплексный сульфат кальциевый, комплексный литиевый) в соответствии с разработанными технологиями.

Ключевые слова: биоразлагаемый пластичный смазочный материал, смешанная дисперсионная среда, гетерогенная дисперсная фаза, технология, оборудование, реологические и трибологические свойства.

Введение. Глобальные тенденции развития «зеленой» экономики предусматривают усиление роли возобновляемой энергетики, чистого транспорта, органического сельского хозяйства, «зеленого» строительства, повышение эффективности использования сырья и энергии, увеличение степени переработки отходов, охрану и восстановление естественных экосистем [1]. В этой связи наряду с ветряной, солнечной и водородной энергетикой, информационными технологиями и электротранспортом использование биоразлагаемых материалов в различных сферах (в частности, одноразовая упаковка, биосмазки) является важной составляющей «зеленой» экономики [2].

Неуклонный рост парка машин и механизмов, естественно, требует увеличения объемов и расширения ассортимента смазочных материалов для их эффективного обслуживания. В Республике Беларусь ежегодное потребление смазочных материалов, изготавливаемых как внутри страны, так и ввозимых из-за ее пределов, составляет порядка 13–15 тыс. т, из них примерно 90% приходится на жидкие смазочные материалы (моторные, трансмиссионные, гидравлические и др. масла), остальное составляют пластичные смазки и пасты различного функционального назначения (антифрикционные, противопригарные, консервационные и др.).

Смазочные материалы в подавляющем большинстве изготавливаются на основе нефтепродуктов, которые содержат сильнейшие канцерогены с высокой биологической активностью, приводящей к возникновению ряда заболеваний живых организмов. Минеральные (нефтяные) масла трудно поддаются биоразложению под воздействием содержащихся в окружающей среде микроорганизмов. При этом естественная система разложения оказывается перегруженной из-за значительных объемов накопления этих продуктов в результате непредвиденных или технологически обусловленных их утечек (например, смазывание пары рельс–колесо или пильных цепей; двухтактные ДВС). В странах Европейского союза ежегодно около 30–40% из приблизительно 5 млн т отработанных смазочных материалов попадают в окружающую среду (в странах СНГ ситуация в этом плане складывается не проще) [2].

Созданию и применению так называемых «зеленых» смазочных материалов в настоящее время уделяется все большее внимание, что объясняется как минимум двумя причинами. Одна из них обусловлена необходимостью защиты окружающей среды, поскольку смазочные материалы, изготавливаемые в настоящее время, как указывалось выше, в своем большинстве на основе минеральных масел, попадая на стадиях изготовления, транспортировки, хранения, применения и утилизации в окружающую среду, создают биотоксикологические угрозы для человека и всех живых организмов. Вторая причина связана с поисками источников дешевого возобновляемого сырья для смазочных материалов как альтернативы постепенно иссякаемым запасам нефти.

Одним из перспективных вариантов решения этой проблемы является использование сырья растительного происхождения. В ряде стран разработаны нормативные документы и рекомендации поощрительного и принудительного характера, направленные на более широкое применение растительных масел в рецептурах смазочных материалов, в частности рапсового масла и продуктов его переэтерификации [3–6].

Применение биоразлагаемых смазочных материалов в транспорте и другой технике в последние годы начинает расширяться. С экологической точки зрения применение данных продуктов особенно оправдано там, где необходима их быстрая разлагаемость, например, в сельском, лесном и водном хозяйствах, гидравлических системах мобильных машин, в строительной промышленности [2; 7]. Особенно актуально применение биоразлагаемых смазочных материалов в тех случаях, когда существует неизбежность или велика вероятность их попадания в почву, водоемы, атмосферу, в т.ч. в лесном хозяйстве (малоразмерное оборудование (бензопилы, кусторезы) и оборудование для заготовки леса (харвестеры, форвардеры и др.)), в сельском хозяйстве (почвообрабатывающая и уборочная техника), на транспорте (двухтактные двигатели внутреннего сгорания) и др.

Пластичные смазочные материалы (ПСМ) занимают промежуточное положение между твердыми смазочными материалами и маслами. Условно их можно рассматривать как двухкомпонентные системы, состоящие из масла (дисперсионной среды) и загустителя (дисперсной фазы). В качестве дисперсионной среды (ДС), на долю которой приходится 75–95% объема смазки, используются различные смазочные жидкости, и чаще всего (около 97% смазок) это нефтяные масла малой и средней вязкости. В смазках для экстремальных и специфических условий работы используют синтетические масла (полисилоксаны, полигликоли, сложные эфиры, перфтор- и перхлоруглероды и др.). Растительные масла состоят, главным образом, из триглицеридов жирных кислот. Их химические свойства обусловлены в большей степени содержащимися в них ненасыщенными жирными кислотами, т.к. последние наиболее реакционноспособны. Структурные особенности триглицеридов жирных кислот, безусловно, оказывают существенное влияние на трибологические свойства растительных масел. Так, наличие в составе растительных масел полиненасыщенных кислот с присутствием в их молекулярном строении двух- и трехкратных двойных связей придает им функции природных ПАВ, что благоприятно сказывается на образовании граничных слоев с низким сопротивлением сдвигу и повышении износостойкости твердых тел [8–10]. Однако следует иметь в виду такие существенные недостатки растительных масел, как их легкая окисляемость на воздухе и склонность к полимеризации с течением времени, обусловленные, в частности, наличием ненасыщенных связей в структуре триглицеридной молекулы. Поэтому применение смазочных материалов, содержащих в своем составе дисперсионную среду полностью в виде растительного масла (или смеси различных растительных масел), целесообразно только в случаях относительно кратковременного периода их использования (проточное смазывание, частая замена смазочного материала) и при условии хранения в герметичных емкостях без доступа воздуха.

В ПСМ дисперсная фаза (5–25 об.%) образует трехмерный структурный каркас, в ячейках которого удерживается масло. По типу дисперсной фазы ПСМ принято подразделять на четыре основные группы: мыльные (простые, комплексные) – смазки, загустителями которых являются мыла – соли высших жирных кислот (более 80% ассортимента смазок); смазки на углеводородных загустителях (парафин, церезин, петролатум и др.); смазки на высокодисперсных неорганических загустителях (силикогель, сажа, графит, бентонит и т.д.); смазки на полимерных загустителях (полимочевинные, фторопластовые и др.).

Разные типы и комбинации загустителя и базового масла, вместе с дополнительными модификаторами структуры и присадками, придают смазкам их окончательные свойства. Смазки на одном типе загустителя относятся к группе простых смазок (литиевая, кальциевая, полимочевинная, бентонитовая и т.п.). Более высокий уровень реологических и трибологических свойств удается получить при использовании комбинированных дисперсных фаз: или комплексный загуститель (комплексная соль одного аниона высокомолекулярной органической и низкомолекулярной неорганической кислот, например, 12-гидроксистеарат лития + борат (или терефталат) лития), или гетерогенный загуститель (либо сочетание различных солей (например, натриевой и кальциевой) одной и той же карбоновой кислоты, или комбинация загустителей различного типа (например, мыло и высокодисперсные неорганические частицы (литиевая соль 12-гидроксистеариновой кислоты + наночастицы углерода))¹ [11].

С учетом сказанного, представляется, целесообразным создавать биоразлагаемые пластичные смазочные материалы (БПСМ) на базе смеси растительных и минеральных масел с выбором определенного соотношения между их содержанием, а также с использованием одинарных или гетерогенных дисперсных фаз, исходя из требуемого уровня работоспособности (реологических и трибологических свойств), и желаемой скоротечности процесса биодеструкции продукта при его утилизации или попадании (случайном либо технологически обусловленном) в окружающую среду. Это позволит обеспечить сохранение структурного состояния и высокий уровень потребительских свойств смазочного материала в течение определенного промежутка времени с учетом специфики смазывания узлов трения, а также длительности хранения и использования смазочного материала.

¹ Ивахник, А.В. Пластичные смазочные материалы на основе бинарной дисперсной фазы повышенной нагрузочной способности : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.09 / А.В. Ивахник. – Минск, 2014. – 190 л.

Целью данной работы являлась разработка технологий и оборудования для производства биоразлагаемых пластичных смазок со смешанной дисперсионной средой (смесь растительного и минерального масел) и одинарной (кальцевой) или гетерогенной (литий-кальцевой, сульфонат кальцевой) дисперсионной фазой.

Методика исследований. Для отработки технологий получения пластичных смазок со смешанной дисперсионной средой использовались масло минеральное I группы по стандарту API (American Petroleum Institute) марки И-40А (ГОСТ 20799-88), масло высокоочищенное III группы по стандарту API марки HC-4 (ТУ ВУ 300042199.037-2015) пр-ва ОАО «НАФТАН» и масло рапсовое (ГОСТ 31759-2012) пр-ва ООО «РАПС». Для синтеза одинарного кальцевого загустителя использовались кислота 12-гидрооксистеариновая (ТУ 38 101 721) и гидроокись кальция (ГОСТ 9262-77), а для гетерогенного литий-кальцевого загустителя – дополнительно моногидрат лития гидроокиси (ГОСТ 8595-83). Для синтеза пластичной смазки, загущенной гетерогенным сульфонат кальцевым комплексом, использовались кислота 12-гидрооксистеариновая (ТУ 38 101 721), кислота уксусная (ГОСТ Р 55982-2014), гидроокись кальция (ГОСТ 9262-77), высокощелочной сульфонат кальция в виде присадки ССК-400D (ТУ ВУ 390401182.022-2011). Для улучшения функциональных свойств применялись следующие присадки: депрессорная присадка К-110 (ТУ 0257-037-40065452-03), адгезионная присадка Petrolad 484 BD (пр-ва компании «BRB»), многофункциональная присадка ДФ-11 (ТУ 0257-005-00044434-99).

Качество пластичных смазок оценивалось по показателю пенетрации (ГОСТ 5346-78), температуре каплепадения (ГОСТ 32322-2013), коллоидной стабильности (ГОСТ 7142-74), массовой доле механических примесей (ГОСТ 1036-75), содержанию воды (ГОСТ 1547-84) и трибологическим характеристикам, определяемым на четырехшариковой машине трения (ЧМТ) по ГОСТ 9490-75. Исползованный в работе метод оценки биоразлагаемости смазочных материалов основан на изучении динамики превращений жирных кислот и определении степени их деструкции в течение 28 суток. При этом жирные кислоты переводились в их метиловые эфиры, и биоразлагаемость определялась исходя из содержания в образцах метиловых эфиров жирных кислот, установленного методом газожидкостной хроматографии (ГЖХ-анализа) с использованием газового хроматографа Agilent 7820A GC (Agilent Technologies, США).

Отработка компонентного состава и режимов получения БПСМ. Основным объективным критерием, по которому смазочный материал относят к категории биологически безопасных материалов, в соответствии с нормативом OECD 301 В «Оценка способности органических соединений к биологическому разложению в водной среде. Метод анализа выделившегося диоксида углерода», является степень биоразлагаемости не менее 80%. Однако базовые масла III группы по стандарту API имеют меньшую скорость биоразложения относительно растительных масел, что препятствует возможности полной замены ими растительных масел в производстве биоразлагаемых пластичных смазок, и требуется установление оптимального соотношения в дисперсионной среде биоразлагаемой пластичной смазки растительного масла и масла III группы. Растительные масла более чувствительны, чем минеральные, к воздействию воды и высокой температуры, поэтому рациональная структура технологического процесса получения пластичной смазки с использованием растительного масла должна разрабатываться с учетом химического состава растительного масла и влияния на него контакта с водой и термического воздействия.

Известно, что пластичные смазки должны иметь слабощелочную реакцию. Массовая доля свободной щелочи в пересчете на NaOH, как правило, составляет 0,7–1,2%, а массовая доля свободных органических кислот – не более 1,5 мг КОН на 1 г смазки, что необходимо для придания пластичной смазке антикоррозионных свойств и повышения стойкости при хранении, т.к. в процессе хранения происходит некоторое окисление базовых масел с образованием кислотных продуктов². При применении в качестве дисперсионной среды растительных масел этот показатель становится наиболее актуальным, что обусловлено разнообразием состава растительных масел, содержащих различные изомеры жирных кислот, циклические кислоты, оксикислоты (насыщенные и ненасыщенные). В процессе хранения жиры в растительных маслах нередко подвергаются глубоким изменениям, особенно в присутствии воды, что объясняется значительным количеством в них непредельных соединений, в частности, эфиров ненасыщенных жирных кислот, которые весьма неустойчивы, и при контакте с водой происходит расщепление (гидролиз) эфирных связей с накоплением свободных жирных кислот. Под воздействием высоких температур резко ускоряются процессы окисления растительных масел, которые протекают через присоединение в ненасыщенных веществах растительных масел молекулы кислорода по месту двойных связей с образованием циклической перекиси и повышением кислотного числа масла [12]. В связи с этой особенностью в технологических процессах следует минимизировать воздействие воды и температуры на растительные масла, что особенно важно в процессах производства пластичных смазок.

Для решения поставленной задачи предложен вариант построения технологических процессов получения пластичных смазок с применением растительных масел, исключая длительный воздействие высоких температур и воды на растительные масла³ [13]. Как правило, при производстве мыльных пластичных смазок щелочи вводятся

² Манг, Т. Смазки. Производство, применение, свойства : справ. : [пер. 2-го англ. изд.] / Т. Манг, У. Дрезель; под ред. В.М. Школьников. – СПб. : Профессия, 2010. – 994 с.

³ Биоразлагаемая пластичная смазка и способ ее получения : решение о выдаче патента Респ. Беларусь от 12.11.2021 по заявке № а20200310 от 06.11.2020 / В.И. Жорник, А.В. Запольский, А.В. Ивахник, В.П. Ивахник.

в реакционную массу в виде водных растворов, что позволяет отсоединить, например, молекулу воды из состава моногидрата гидроксида лития или перевести гидроксид кальция в активное реакционно-способное состояние. Также применение водных растворов позволяет улучшить равномерность распределения щелочи в реакционном объеме, так как по мере их ввода реакционная масса становится более вязкой, а следовательно, замедляются процессы диспергирования реакционных компонентов и снижается скорость протекания реакции нейтрализации. В предложенном технологическом подходе, в частности, моногидрат гидроксида лития и/или гидроксид кальция вводятся в базовое масло III группы не в виде водных растворов, а в виде предварительно подготовленной дегидратированной масляной суспензии после введения и расплавления в базовом минеральном масле 12-гидроксистеариновой кислоты. Это позволяет практически полностью исключить участие химически несвязанной воды в технологическом процессе получения пластичной смазки и ее негативное влияние на растительное масло⁴.

Кальцевый загуститель. При производстве синтетического солидола проходят следующие технологические операции: загрузка части (30–50%) минерального масла (в частности, масла И-40А); его нагрев до температуры 60–65 °С; добавление жирных кислот фракции С 20 и выше с кислотным числом 100–125 мг КОН/г продукта; разогрев массы до температуры 85–90 °С; добавление водной суспензии гидроксида кальция со значительным количеством воды; медленный нагрев реакционной массы до температуры 98–100 °С для проведения реакции кислот с гидроксидом кальция с образованием кальциевых мыл; удаление воды (при этом очень важно удалить воду не полностью, а до ее остаточного содержания в количестве 2–4 масс.%, в противном случае происходит разрушения структуры пластичной смазки и ее разжижение); отключение нагрева и добавление оставшейся части минерального масла. Синтетический солидол имеет волокнистое строение одинарной дисперсной фазы (рисунок 1, а) и характеризуется достаточно хорошей коллоидной стабильностью и водостойкостью, высокими защитными свойствами. Недостатками Солидола С являются узкий диапазон рабочих температур (–30...+65 °С) и низкая механическая стабильность. При разрушении его волокнистой дисперсной фазы вначале сильно снижается предел прочности, что может привести к вытеканию смазки из узла трения; во время отдыха после деформирования Солидол С тиксотропно упрочняется, и при чрезмерном уплотнении волокон (рисунок 1, б) его эксплуатационные свойства ухудшаются.

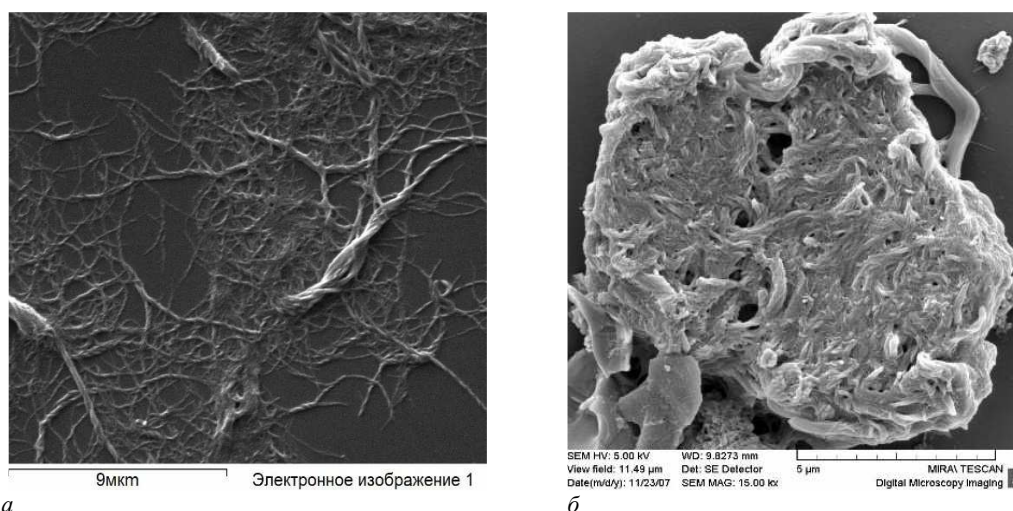


Рисунок 1. – Дисперсная фаза Солидола С в исходном состоянии (а) и после длительного нагружения в узле трения (б)

Технологический процесс получения биоразлагаемой смазки СОЛИДОЛ БИО короче, т.к. гидроокись кальция применяется не в виде водного раствора, а в виде масляной суспензии. В данном случае основные технологические операции следующие: загрузка части (45–50 масс.%) минерального масла (в частности, масла НС-4); его нагрев до температуры 80–82 °С; добавление жирных кислот (наиболее эффективно применение 12-гидроксистеариновой кислоты); их расплавление и добавление масляной суспензии гидроксида кальция; нейтрализация кислот при интенсивном диспергировании реакционной массы; нагрев реакционной массы до температуры 135–137 °С с параллельным удалением связанной воды; отключение нагрева и добавление растительного масла.

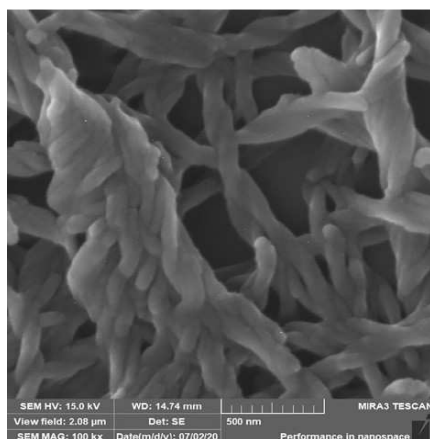
Несмотря на то, что в данном случае имеет место нагрев реакционной массы до более высоких температур, суммарные затраты энергии значительно меньше в связи со уменьшением общей длительности технологического процесса.

⁴ Биоразлагаемая пластичная смазка и способ ее получения : реш. о выдаче патента РФ от 12.11.2021 по 3-ке № а20200310 от 06.11.2020 / МПК С 10М 101/02, С 10М 117/04, С 10М 177/00 / В.И. Жорник, А.В. Запольский, А.В. Ивахник, В.П. Ивахник.

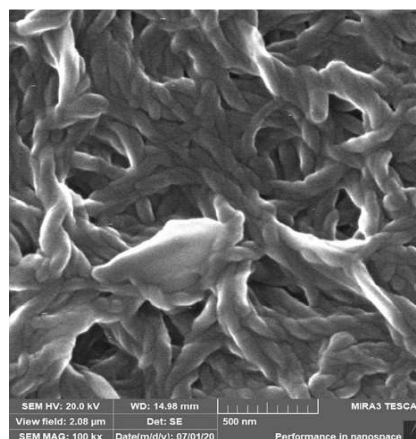
Литий-кальциевый загуститель. В разработанном варианте получения биоразлагаемой литий-кальциевой пластичной смазки⁵ после введения в базовое масло III группы и расплавления в нем 12-гидроксистеариновой кислоты добавляются предварительно подготовленные масляные суспензии моногидрата гидроксида лития и гидроксида кальция, и затем осуществляется нагрев реакционной массы до температуры 110–115 °С при постоянном диспергировании порошкообразных компонентов в гидродинамическом диспергаторе до наноразмерного уровня и интенсивном перемешивании реакционной массы с целью активации протекания реакции нейтрализации. Подобное воздействие способствует отсоединению молекулы воды в моногидрате гидроксида лития и удалению сорбированной воды гидроксида кальция. Щелочи переходят в активное состояние, способствующее повышению их реакционной способности. При этом они максимально равномерно распределяются по объему реакционной массы, обеспечивая стабильность протекания реакции нейтрализации. Нагрев до более низких температур (менее 110 °С) не позволяет гарантированно удалить воду, а применение более высоких температур (более 115 °С) энергетически нецелесообразно, и при этом чрезвычайно бурное кипение выделяющейся связанной воды может приводить к значительному расширению реакционной массы и ее выбросу из реактора.

Следует отметить, что в этом случае химические реакции, сопровождающие формирование дисперсной фазы, протекают в среде масла III группы, в нем же проходит и термомеханическая обработка реакционной массы с достижением расплава при температуре 175–180 °С (данное масло отличается высокой стойкостью к окислению при повышенных температурах), а растительное масло добавляется только на стадии охлаждения. Данный вариант технологического процесса получения биоразлагаемой пластичной смазки позволяет исключить длительное высокотемпературное воздействие на растительные масла и снизить вероятность деградации их свойств на стадии получения пластичного смазочного материала.

Изучение изображений дисперсной фазы образцов пластичных смазок, полученных с помощью сканирующей электронной микроскопии, показало, что на микроуровне структура дисперсной фазы пластичной смазки, полученной по варианту технологии⁵, характеризуется более равномерным распределением волокон загустителя по объему материала (рисунок 2, а), чем у пластичной смазки, полученной по технологической схеме⁶, при реализации которой используется водная суспензия щелочей и формирование загустителя изначально протекает в ограниченном объеме, обусловленном объемом, непосредственно занимаемом реакционными компонентами (12-оксистеариновая кислота и водная суспензия смеси щелочей), без участия дисперсионной среды. Последнее осложняет структурообразование пространственного каркаса загустителя, он формируется в виде чрезмерно загущенной массы, что в дальнейшем вызывает затрудненное диспергирование загустителя в дисперсионной среде, неоднородное его распределение по объему пластичного смазочного материала (рисунок 2, б). При этом в структуре смазки, полученной по технологической схеме⁶, видны остатки непрореагировавших, плохо диспергированных исходных компонентов дисперсной фазы, что свидетельствует о незавершенности процесса формирования ДФ в данном случае.



а



б

а – вариант⁵; б – вариант⁶

Рисунок 2. – Микроструктура дисперсной фазы пластичных смазок, полученных по различным технологическим схемам

⁵ Биоразлагаемая пластичная смазка и способ ее получения : решение о выдаче патента Респ. Беларусь от 12.11.2021 по заявке № а20200310 от 06.11.2020 / В.И. Жорник, А.В. Запольский, А.В. Ивахник, В.П. Ивахник.

⁶ Экологически чистый смазочный материал и способ его производства : пат. РФ № 2551679 / В.И. Колесников, М.В. Бойко, Д.Ю. Марченко, К.С. Лебединский. – Опубл. 27.05.2015.

Волокна дисперсной фазы смазки, полученной по варианту⁷, имеют большую длину (порядка 3–5 мкм), а их диаметр составляет 0,15–0,2 мкм. Они имеют более выраженную спиралеобразную морфологию, что также должно способствовать повышенной механической и коллоидной стабильности пластичного смазочного материала.

Комплексный сульфонат кальциевый загуститель. Дисперсная фаза комплексной сульфонат кальциевой смазки может быть образована при взаимодействии 12-гидроксистеариновой, уксусной и сульфоновой кислот с гидроксидом кальция. При этом могут реализовываться технологические схемы с использованием, например, предварительного осернения растительного масла, либо с применением компонентов, содержащих сульфонат кальция. В данном случае технология производства сульфонат кальциевой смазки основана на введении в базовое масло сверхщелочного сульфоната кальция с общим щелочным числом TBN (total base number) = 150–500 мг КОН/г. Сверхщелочной сульфонат, смешанный с базовым маслом, обрабатывается кислотой, чтобы дестабилизировать его мицеллярную структуру. Затем вводятся промоторы и вода, и реакционная масса нагревается до температуры гелеобразования (80–90 °С). В реакционной смеси при этом аморфный карбонат кальция превращается в кальцит (кристаллическая модификация карбоната кальция). При более высоких температурах реакция конверсии способствует образованию фатерита, нежелательной кристаллической формы карбоната кальция, ухудшающей свойства сульфонат кальциевой смазки⁸. В сульфонат кальциевой смазке дисперсная фаза на микроуровне формируется не в виде волокон, как в других мыльных ПСМ, а представляет собой совокупность отдельных частиц нанокальцита в стабилизирующей оболочке из амфифильных жидкокристаллических полимеров, которые за счет сил межмолекулярного взаимодействия между собой образуют подвижный пространственный каркас (рисунок 3), который обеспечивает этой смазке высокий уровень тиксотропности. Благодаря отсутствию в ДФ волокон, которые могли бы безвозвратно разрушиться при механическом воздействии на ПСМ, при снятии нагрузки межмолекулярные связи между отдельными элементами структурного каркаса этой смазки снова восстанавливаются, в то время как в смазках с волокнистой дисперсной фазой наблюдается разрушение как дисперсионной (связи между волокнами), так и кристаллизационной (связи внутри волокон) структуры ДФ. В результате подобной деградации волокнистой дисперсной фазы теряется ее загущающая способность, ухудшается маслоудержание, снижаются тиксотропные свойства пластичной смазки.

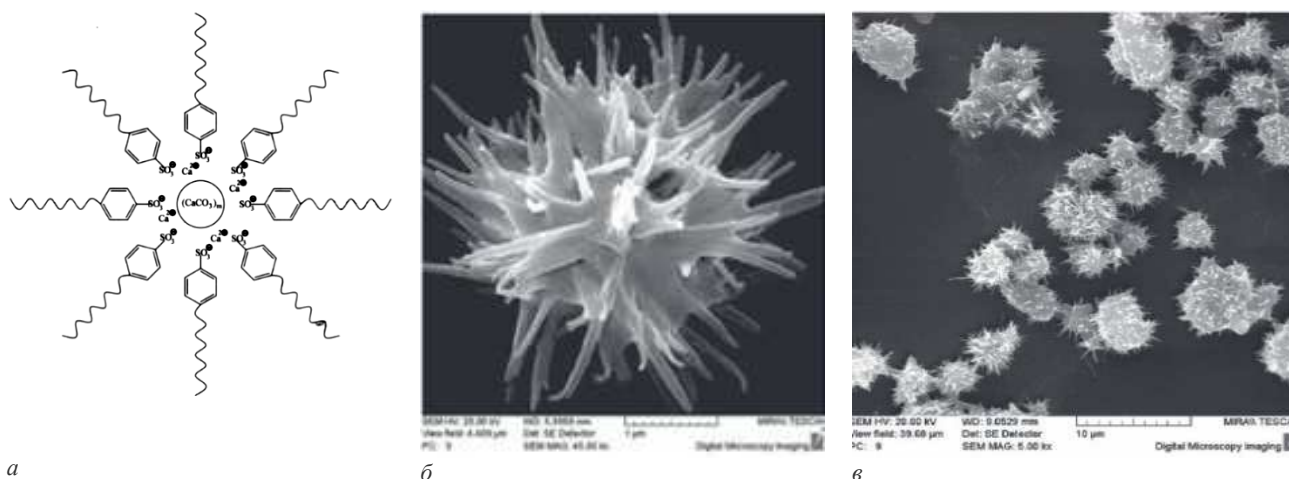


Рисунок 3. – Строение молекулы сверхщелочного сульфоната кальция⁸ (а), единичный элемент (б) и пространственное строение ДФ (в) комплексной сульфонат кальциевой смазки

Многочисленные мицеллы, образующиеся благодаря амфифильности оболочки, позволяют лучше удерживать масло в структуре ПСМ, что улучшает коллоидную стабильность сульфонат кальциевой смазки, при этом не снижая заметно ее смазывающей способности. Водостойкость сульфонат кальциевой смазки также взаимосвязана с этой особенностью структуры. В отличие, например, от литиевых смазок, в которых литиевые мыла под воздействием воды начинают вымываться (вода разрушает взаимосвязь волокон)⁸, сульфонатные

⁷ Биоразлагаемая пластичная смазка и способ ее получения : решение о выдаче патента Респ. Беларусь от 12.11.2021 по заявке № а20200310 от 06.11.2020 / В.И. Жорник, А.В. Запольский, А.В. Ивахник, В.П. Ивахник.

⁸ Ивахник, А.В. Пластичные смазочные материалы на основе бинарной дисперсной фазы повышенной нагрузочной способности : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.09 / А.В. Ивахник. – Минск, 2014. – 190 л.

смазки за счет амфифильности не размываются водой, а «впитывая» ее в себя (до 10 об.%), уплотняют узел трения и при этом не теряют смазочной способности. Антикоррозионные свойства кальцита в определенной степени нивелируют воздействие воды на металл, а молекулы кальцита «схватываются» с металлом, обеспечивая куда более сильное удержание смазки на поверхности трения по сравнению с загустителями других типов. Частицы кальцита при температурном воздействии (вплоть до 250 °С) не разрушаются, поэтому смазка имеет очень высокие показатели температуры каплепадения и, соответственно, рабочих температур.

Преимуществом технологических процессов получения БПСМ со смешанной дисперсионной средой, реализуемых по схеме⁹, является резкое снижение негативного влияния воды на растительное масло, сокращение общей продолжительности варки и, соответственно, уменьшение энергозатрат.

В таблице 1 приведены сравнительные данные пластичных смазок, изготовленных с применением дисперсионной среды из смеси минерального и растительного масел при гетерогенных загустителях (смазка OIMOL CL BIO на литий-кальциевом и смазка OIMOL KSC BIO на комплексном сульфат кальциевом загустителе) в сравнении с биоразлагаемой смазкой СОЛИДОЛ БИО и синтетическим солидолом (Солидол С), содержащими различные виды одинарного кальцевого загустителя.

Анализируя данные, приведенные в таблице 1, можно сделать следующие выводы. Введение растительных масел для пластичных смазок с гетерогенной дисперсной фазой практически не оказывает влияния на их температуру каплепадения, которая остается на уровне выше 200 °С (для сравнения температура каплепадения комплексной сульфат кальциевой смазки OIMOL KSC WR 2 с чисто минеральной дисперсионной средой (масло И-40А) соответствует 230 °С [14]). При этом у смазки СОЛИДОЛ БИО температура каплепадения выше на 30 °С температуры каплепадения смазки Солидол С в связи с тем, что дисперсная фаза смазки СОЛИДОЛ БИО имеет другую природу, свойственную безводным кальцевым смазкам, по сравнению с гидратированной кальцевой смазкой Солидол С. С этим также связано и отсутствие содержания воды в смазке СОЛИДОЛ БИО в отличие от Солидола С, где ее содержание составляет 2–3 масс.%, и она технически необходима для структурообразующих целей.

Таблица 1. – Сравнительная характеристика пластичных смазок, полученных с использованием различных дисперсионных сред и загустителей

Наименование показателя	Пластичные смазки			
	Солидол С	СОЛИДОЛ БИО	OIMOL CL BIO	OIMOL KSC BIO
Тип загустителя	кальцевый гидратированный	кальцевый безводный	литий-кальцевый	сульфат кальцевый комплекс
Температура каплепадения, °С	85	115	205	225
Пенетрация, 10 ⁻¹ мм	290	265	280	265
Коллоидная стабильность, %	8	8	5	4
Критическая нагрузка, Н	980	1098	1098	2520
Нагрузка сваривания, Н	1620	1960	1960	6200
Показатель износа, мм	0,63	0,61	0,50	0,41
Содержание воды, %	2–3	отсут.	отсут.	отсут.
Биоразлагаемость, %	15	80	83	81

Более высокая нагрузочная способность (критическая нагрузка 2520 Н, нагрузка сваривания 6200 Н), повышенная термическая стойкость (температура каплепадения 225 °С), улучшенная коллоидная стабильность (3%) пластичной смазки с комплексным сульфат кальцевым загустителем обусловлены специфичным строением ее гетерогенной дисперсной фазы, представляющей собой совокупность частиц термически стойкого нанокальцита в стабилизирующей оболочке из амфифильных жидкокристаллических полимеров. Биоразлагаемость БПСМ с гетерогенной и одинарной дисперсной фазой находится на уровне 80–83%, что, например, в 5,5 раза выше биоразлагаемости смазки Солидол С.

Разработка оборудования для получения пластичных смазок. Для проведения цикла исследований по отработке компонентных составов и режимов получения биоразлагаемых ПСМ, а также организации их промышленного выпуска было разработано и изготовлено два варианта технологического оборудования: лабораторное и промышленное. Оборудование для производства ПСМ должно обеспечивать завершение реакционных процессов в течение минимально возможного промежутка времени с получением однородного продукта. Как правило, на практике реакторы для синтеза ПСМ отличаются многообразием конструкции и обычно приспособлены под конкретную номенклатуру и объем производства. В то же время на основе анализа имеющихся данных выработаны основные требования, которым должен удовлетворять лабораторный реактор для получения ПСМ⁹:

⁹ Биоразлагаемая пластичная смазка и способ ее получения : решение о выдаче патента Респ. Беларусь от 12.11.2021 по заявке № а20200310 от 06.11.2020 / В.И. Жорник, А.В. Запольский, А.В. Ивахник, В.П. Ивахник.

соотношение диаметра реактора к его высоте – 2 : 3;

форма дна реактора – округлое с конической вставкой перед горловиной насоса;

вид нагревателя – электрический трехсекционный (две секции на стенках реактора, одна на днище);

тип мешалки – лопастная;

тип насоса – шестеренный;

тип диспергатора – гидродинамический проточный;

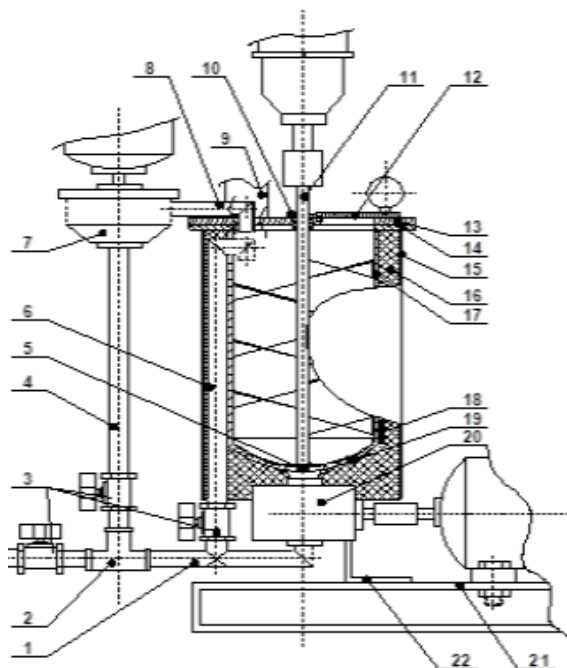
схема соединения диспергирующего и циркуляционного контуров – байпас;

тип фильтра – проточный сетчатый;

способ управления режимом синтеза – посредством цифрового измерителя-регулятора с подключением к компьютеру;

вид вентиляции – местная и общая.

Лабораторное оборудование отвечает всем требованиям к технологическому оборудованию для производства ПСМ и полностью моделирует промышленные установки. На рисунке 4 представлена схема и общий вид лабораторной установки УПСМ-10, предназначенной для отработки компонентного состава и технологических режимов получения БПСМ.



а



б

- 1 – разводная трубка; 2 – тройник; 3 – вентиль; 4 – контур диспергирования; 5 – опорный узел; 6 – контур циркуляции;
7 – диспергатор; 8 – трубка; 9 – местный отсос; 10 – сальник; 11 – мешалка; 12 – крышка реактора;
13 – верхняя пластина; 14 – нижняя пластина; 15 – кожух; 16 – теплоизоляция; 17 – стенка котла; 18 – нагреватель;
19 – термopара; 20 – шестеренный насос; 21 – станина установки; 22 – опора насоса

Рисунок 4. – Схема (а) и общий вид (без защитного кожуха) (б) лабораторной установки УПСМ-10

Реактор установки УПСМ-10 снабжен мешалкой, смонтированной на опорном подшипнике, установленном на днище, и подшипнике, расположенном в крышке реактора. Опорный подшипник находится в крестовине, размещенной над горловиной шестеренного насоса НШ-25. Сложно-профильная мешалка приводится в движение червячным мотор-редуктором через быстроразъемную муфту. Лопасти мешалки обеспечивают нагнетание реакционной массы к насосу, что предотвращает его завоздушивание. Реактор снабжен хомутовыми миканитовыми электронагревателями, укрытыми теплоизоляцией и защитным кожухом. Для циркуляции и выгрузки продукта реактор снабжен циркуляционным контуром, образованным шестеренным насосом, набором трубок и вентилях. На крышке имеется патрубок для местного отсоса паров. Для диспергирования компонентов реакционной массы имеется подключенный к циркуляционному контуру по системе байпас диспергирующий контур с размещенным в нем проточным диспергатором типа НДЛ 000РЭ1, в котором реализуется эффект кавитации с возможностью диспергирования компонентов реакционной массы до наноразмерного уровня. Для контроля и регулирования температуры реактор обеспечен двумя термopарами, установленными на стенке котла и в горловине насоса. Управление температурно-временными параметрами процесса синтеза ПСМ осуществляется с помощью прибора регулирования температуры типа OWEN TRM-251. Техническая характеристика установки УПСМ-10 приведена в таблице 2.

Таблица 2. – Техническая характеристика лабораторной установки УПСМ-10

Наименования показателя	Значение
Объем реактора, л	10
Скорость вращения мешалки, об/мин	60
Привод мешалки, кВт	0,75
Тип насоса	НШ-25
Параметры привод насоса	1500 об/мин, 0,75 кВт
Мощность нагревателя, кВт	1,2
Максимальная температура в реакторе, °С	250
Точность регулирования температуры	1 – 2 °С
Диспергатор	НДЛ 000РЭ1, 3000 об/мин, 2 кВт

С целью организации промышленного производства на предприятии ООО «Евразия Лубрикантс» организован и введен в эксплуатацию участок по выпуску пластичных смазочных материалов мощностью до 3000 т/год, в т.ч. биоразлагаемых до 100 т/год. Участок площадью 300 м² оснащен системами электропитания мощностью 800 кВт, водоснабжения и приточно-вытяжной вентиляции. На участке смонтирована промышленная установка, включающая 5 реакторов-смесителей РС 2200-04/18, объединенных единой эстакадой, а также имеется технологический модуль для подготовки модифицированных компонентов гетерогенной дисперсной фазы РС 200-01/18 (рисунок 5).



а



б

Рисунок 5. – Технологический модуль РС 200-01/18 для подготовки компонентов (а) и участок по производству биоразлагаемых смазочных материалов на базе реактора-смесителя РС 2200-04/18 (б)

Технические характеристики технологического модуля РС 200-01/18 и реактора-смесителя РС 2200-04/18 приведены в таблице 3.

Для дозирования сыпучих сырьевых компонентов обустроено специальное помещение, имеются также три фасовочные линии готовой продукции. Участок предназначен для промышленного производства широкого спектра пластичных смазочных материалов с использованием дисперсионных сред растительного и минерального происхождения на различных типах загустителя (литиевый, кальциевый, литиево-кальциевый, сульфонат кальциевый и др.), в том числе биоразлагаемых пластичных смазок OIMOL CL BIO (ТУ BY 190410065.021-2020) по технологическому процессу № 01101.00021 «Изготовление биоразлагаемой пластичной смазки OIMOL CL BIO» и OIMOL KSC BIO (ТУ BY 190410065.023-2021) по технологическому процессу № 01101.00023 «Изготовление биоразлагаемой пластичной смазки OIMOL KSC BIO».

На предприятии ОДО «Спецсмазки» организован и введен в эксплуатацию участок по производству биоразлагаемых пластичных смазочных материалов мощностью до 50 т/год, оснащенный необходимым комплексом технологического оборудования. Участок предназначен для малотоннажного производства биоразлагаемых пластичных смазочных материалов, в т.ч. пластичных смазок OIMOL CL BIO, OIMOL KSC BIO, СОЛИДОЛ БИО (ТУ BY 190410065.022-2020) по технологическому процессу № 01101.00022 «Изготовление биоразлагаемой пластичной смазки СОЛИДОЛ БИО» и ИТМОЛ-150 БИО (ТУ BY 190410065.024-2022) по технологическому процессу № 01101.00024 «Изготовление биоразлагаемой пластичной смазки ИТМОЛ-150 БИО».

Таблица 3. – Технические характеристики реактора-смесителя РС 2200-04/18 и технологического модуля РС 200-01/18

Наименование показателя	Вид оборудования	
	модуль РС 200-01/18	реактор РС 2200-04/18
Объем реакционной камеры, л	200	2500
Электрическая мощность приводов, кВт	1,5	7,5
Вид нагревательной системы	ТЭН	керамические
Мощность системы нагрева, кВт	10	120
Система управления параметрами синтеза:	регулятор температуры; уровень диспергирования	регулятор температуры; уровень диспергирования; технологический цикл
Точность регулирования температуры, °С	±0,5	±1,0
Система диспергирования компонентов	проточный диспергатор	проточный диспергатор
Вид фильтрующей системы	сетчатый фильтр	сетчатый фильтр
Масса, кг	240	1400
Габариты, ВхШхД, м	1,8х1,5х1,0	3,5х1,75х2,0

Выпускаемые биоразлагаемые пластичные смазки предназначены для применения в узлах трения лесозаготовительной и сельскохозяйственной техники, карьерного и железнодорожного транспорта, технологического оборудования машиностроительного производства и перерабатывающей промышленности, а также в других отраслях при наличии повышенных требований к уровню реологических и трибологических свойств продукта и его экологической безопасности.

Заключение. Показано, что биоразлагаемые пластичные смазочные материалы целесообразно создавать на базе смеси растительных и минеральных масел (смешанная дисперсионная среда) с выбором определенного соотношения между их содержанием, а также с использованием одинарных и гетерогенных дисперсных фаз, исходя из заданного уровня работоспособности (реологических и трибологических свойств) и требуемой скорости процесса биодеструкции продукта при его утилизации или попадании (случайном либо технологически обусловленном) в окружающую среду. При этом технологический цикл получения пластичной смазки должен обеспечивать минимальное воздействие высоких температур и воды на растительный компонент дисперсионной среды. С целью реализации этого подхода применен способ получения биоразлагаемых мыльных пластичных смазок, в котором щелочной компонент вводится в реакционную массу не в виде традиционно используемого водного раствора, а в составе масляной суспензии. При этом синтез дисперсной фазы протекает в минеральном компоненте дисперсионной среды, а растительное масло добавляется только на стадии охлаждения реакционной массы.

Данный способ проиллюстрирован на примере технологий получения биоразлагаемых пластичных смазочных материалов на кальциевом (смазка СОЛИДОЛ БИО), литий-кальциевом (смазка OIMOL LC BIO) и комплексном сульфонат кальциевом (смазка OIMOL KSC BIO) загустителях. В частности, в технологическом процессе получения смазки OIMOL LC BIO в качестве дисперсионной среды используется смесь рапсового масла и минерального масла III группы по стандарту API, а моногидрат гидроксида лития и гидроксид кальция вводятся в базовое масло III группы в виде масляной суспензии и нейтрализуются 12-гидроксистеариновой кислотой с образованием гетерогенной дисперсной фазы, состоящей из стеарата лития и стеарата кальция. Рапсовое масло вводится в реакционную массу на завершающей стадии процесса после формирования гетерогенной дисперсной фазы и удаления имевшейся в связанном виде в моногидрат гидроксида лития воды, подвергаясь только кратковременно высокотемпературному воздействию.

Более высокая нагрузочная способность (критическая нагрузка 2520 Н, нагрузка сваривания 6200 Н), повышенная термическая стойкость (температура каплепадения 225 °С), улучшенная коллоидная стабильность (3%) пластичной смазки на комплексном сульфонат кальциевом загустителе OIMOL KSC BIO (по сравнению со смазками с волокнистой кальциевой (смазка СОЛИДОЛ БИО) и литий-кальциевой (смазка OIMOL LC BIO) дисперсной фазой) обусловлены специфичным строением ее гетерогенной дисперсной фазы, представляющей собой совокупность частиц термически стойкого нанокальцита в стабилизирующей оболочке из амфифильных жидкокристаллических полимеров. Биоразлагаемость разработанных БПСМ находится на уровне 80–83%, что, например, в 5,5 раза выше биоразлагаемости смазки Солидол С.

Для отработки компонентного состава и режимов получения, а также серийного выпуска пластичных смазок разработано и изготовлено технологическое оборудование лабораторного (мощность 10 кг/цикл) и промышленного (мощность 200 и 2500 кг/цикл) типа. Отличительной особенностью данного оборудования является наличие в нем подсоединенного к циркуляционному контуру по системе байпас диспергирующего контура с гидродинамическим диспергатором, реализующим эффект кавитации с возможностью диспергирования компонентов реакционной массы до наноразмерного уровня.

Промышленный выпуск биоразлагаемых пластичных смазок на загустителях различного вида (литий-кальциевая смазка OIMOL CL BIO – ТУ ВУ 190410065.021-2020, кальциевая смазка СОЛИДОЛ БИО –

ТУ ВУ 190410065.022-2020, комплексная сульфонат кальциевая смазка OIMOL KSC BIO – ТУ ВУ 190410065.023-2021, комплексная литиевая смазка ИТМОЛ 150 БИО – ТУ ВУ 190410065.024-2022) организован на предприятиях ООО «Евразия Лубрикантс» (мощность участка до 100 т/год и ОДО «Спецсмазки» (мощность участка до 50 т/год). Выпускаемые биоразлагаемые пластичные смазки предназначены для применения в узлах трения лесозаготовительной и сельскохозяйственной техники, в карьерном и железнодорожном транспорте, в технологическом оборудовании в машиностроении и перерабатывающей промышленности и в других отраслях при условии повышенных требований к уровню реологических и трибологических свойств и показателей экологической безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Деревяго, И.П. Концепция «зеленой экономики» и возможности ее реализации в условиях Республики Беларусь / И.П. Деревяго // Белорус. экон. журн. – 2017. – № 1. – С. 24–37.
2. Евдокимов, А.Ю. Смазочные материалы в техносфере и биосфере: экологический аспект / А.Ю. Евдокимов, И.Г. Фукс, И.А. Любинин. – Киев : Атика-Н, 2012. – 292 с.
3. Fessenbecker, A. Additives for environmentally acceptable lubricant / A. Fessenbecker, I. Roehrs, R. Pegnoglou // NLGI Spokesman : Journal of the National Lubricating Grease Institute. – 1996. – No. 6(60). – P. 9–25.
4. Rhee, I. 21st century military biodegradable greases / I. Rhee // NLGI Spokesman: Journal of the National Lubricating Grease Institute. – 2000. – No. 1(64). – P. 8–17.
5. Состояние и перспективы развития производства биоразлагаемых пластичных смазок (обзор) / О.П. Паренего [и др.] // Нефтехимия. – 2017. – № 6. – С. 766–768.
6. Запольский, А.В. Биоразлагаемые смазочные материалы – важнейший продукт смазочной индустрии будущего / А.В. Запольский // Новая экономика. – 2018. – № 1. – С. 226–229.
7. Dhorali, G. Vegetable Oil based Bio-lubricants and Transformer Fluids. Applications in Power Plants / G. Dhorali, P.C. Venkata. – East, Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2018. – 152 p.
8. Kato, N. Lubrication life of biodegradable greases with rapeseed oil base / N. Kato // Lubr. Eng. – 1999. – No. 8(55). – P. 19–25.
9. Gnanasekaran, D. Vegetable Oil based Biolubricants and Transformer Fluids: Applications in Power Plants / D. Gnanasekaran, V.P. Chavadi. – Springer Nature Pte. Ltd., 2018. – 155 p.
10. Трибологические особенности экологически чистых смазочных композиций на основе рапсового масла / С.Ф. Ермаков [и др.] // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, № 2. – С. 245–252.
11. Ищук, Ю.Л. Состав структура и свойства пластичных смазок / Ю.Л. Ищук. – Киев : Наук. думка, 1996. – 510 с.
12. О'Брайен, Р.Д. Жиры и масла. Производство, состав и свойства, применение / Р.Д. О'Брайен. – СПб. : Профессия, 2007. – 751 с.
13. Жорник, В.И. Биоразлагаемые пластичные смазки общетехнического назначения / В.И. Жорник, А.В. Запольский, А.В. Ивахник // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. / ОИМ НАН Беларуси. – 2021. – Вып. 10. – С. 295–301.
14. Жорник, В.И. Структура и свойства комплексной сульфонат кальциевой смазки / В.И. Жорник, А.В. Ивахник, В.П. Ивахник, А.В. Запольский // Механика машин, механизмов, материалов. – 2018. – № 1(42). – С. 44–50.

REFERENCE

1. Derevyago, I.P. (2017). Konceptsiya «zelenoj ekonomiki» i vozmozhnosti ee realizacii v usloviyah Respubliki Belarus' [Concept of «green economy» and the possibilities of its implementation in the conditions of the Republic of Belarus]. *Belorusskij ekonomicheskij zhurnal [Belarusian Economic Journal]*, 1, 24–37. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Evdokimov, A.Yu., Fuks, I.G., & Lyubinini, I.A. (2012). *Smazochnye materialy v tekhnosfere i biosfere: ekologicheskij aspekt [Lubricants in the technosphere and biosphere: environmental aspect]*. Kiev: Atika-N. (in Russ.).
3. Fessenbecker, A., Roehrs, I., & Pegnoglou, R. (1996). Additives for environmentally acceptable lubricant. *NLGI Spokesman*, 6(60), 9–25. (In Engl.).
4. Rhee, I. (2000). 21st century military biodegradable greases. *NLGI Spokesman*, 1(64), 8–17. (In Engl.).
5. Parenago, O.P., Safieva, R.Z., Antonov, S.V., & Stenina, N.D. (2017). Sostoyanie i perspektivy razvitiya proizvodstva biorazlagaemykh plastichnykh smazok (obzor) [State and prospects for the development of the production of biodegradable plastic lubricants (review)]. *Neftekhimiya [Petrochemistry]*, 6, 766–768. (in Russ.).
6. Zapol'skij, A.V. (2018). Biorazlagaemye smazochnye materialy – vazhnejshij produkt smazochnoj industrii budushchego [Biodegradable lubricants are the key to the lubricant industry of the future]. *Novaya ekonomika [New Economy]*, 1, 226–229. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Dhorali, G., & Venkata, P.C. (2018). *Vegetable Oil based Bio-lubricants and Transformer Fluids. Applications in Power Plants*. East, Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd. (In Engl.).
8. Kato, N. (1999). Lubrication life of biodegradable greases with rapeseed oil base. *Lubrication Engineering*, 8(55), 19–25. (In Engl.).
9. Gnanasekaran, D., & Chavadi, V.P. (2018). *Vegetable Oil based Biolubricants and Transformer Fluids: Applications in Power Plants*. Springer Nature Pte. Ltd. (In Engl.).
10. Ermakov, S.F., Chmyhova, T.G., Timoshenko, A.V., & Shershnev, E.B. (2019). Tribologicheskie osobennosti ekologicheskii chistykh smazochnykh kompozicij na osnove rapsovogo masla [Tribological features of environmentally friendly lubricating compositions based on rapeseed oil]. *Trenie i iznos [Friction and wear]*, Vol. 40, 2, 245–252. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Ishchuk, Yu.L. (1996). *Sostav struktura i svojstva plastichnykh smazok [Composition structure and properties of greases]*. Kiev: Navukovaya dumka. (in Russ.).
12. O'Brien, R.D. (2007). *Zhiry i masla. Proizvodstvo, sostav i svojstva, primenenie [Fats and oils. Production, composition and properties, application]*. Saint-Petersburg: Professiya. (in Russ.).

13. Zhornik, V.I., Zapol'skij, A.V., & Ivahnik, A.V. (2021). Biorazлагаемые пластичные смазки общетехнического назначения [Biodegradable greases of general technical purpose]. *Aktual'nye voprosy mashinovedeniya [Actual issues of machine science]*, 10, 295–301. (In Russ., abstr. in Engl.).
14. Zhornik, V.I., Ivahnik, A.V., Ivahnik, V.P., & Zapol'skij, A.V. (2018). Struktura i svoystva kompleksnoj sul'fonat kal'cievoj smazki [Structure and properties of complex calcium sulfonate lubricant]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov, materialov [Mechanics of machines, mechanisms, materials]*, 1(42), 44–50. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 11.12.2022

TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT FOR PRODUCTION BIODEGRADABLE GREASES

V. ZHORNIK, A. ZAPOLSKY, A. IVAKHNIK, A. DUDAN

It is shown that it is advisable to create the biodegradable greases (the BG) on the basis of the mixture of the vegetable and mineral oils (the mixed dispersion medium) with the choice of the certain ratio between their content, as well as using the single or heterogeneous dispersed phases, based on a given level of the performance of the BG (the rheological and tribological properties) and the required transience of the biodegradation process of the product. At the same time the technological cycle of the obtaining of the greases should ensure the minimal influence of the high temperature and water on the vegetable component of the dispersion medium. For the purpose of the implement of this approach the producing method of the biodegradable soap greases has been applied, in which the alkaline component is introduced into the reaction mass not in the form of the traditionally used aqueous solution, but as the part of the oil suspension. This technological technique is illustrated by the example of the producing technologies of the BG on the calcium (the grease СОЛИДОЛ БИО), lithium-calcium (the grease OIMOL LC BIO) and complex calcium sulfonate (the grease OIMOL KSC BIO) thickeners. The rheological and tribological properties of the developed BG are at the level of their analogues made on the basis of mineral oil with the biodegradability of BG approximately 5.5 times higher. The technological equipment of laboratory (capacity 10 kg/cycle) and industrial (capacity 200 and 2500 kg/cycle) types has been developed and manufactured. The distinctive feature of this equipment is the presence in it of the dispersing circuit connected to the circulation circuit via the bypass system and containing the hydrodynamic disperser that implements the cavitation effect with the possibility of the dispersing of the reaction mass components to the nanosized level. The industrial production of the BG on the thickeners of various types (calcium, lithium-calcium, complex calcium sulfonate, complex lithium) has been organized in accordance with the developed technologies.

Keywords: biodegradable grease, mixed dispersion medium, heterogeneous dispersed phase, technology, equipment, rheological and tribological properties

ТРАНСПОРТ

УДК 656.13

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДТП МЕТОДОМ ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

канд. техн. наук, доц. **С.В. СКИРКОВСКИЙ**
(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)

Предложено для установления причин совершения дорожно-транспортных происшествий применить метод эпидемиологического анализа, который широко используется в медицинских исследованиях. Характер влияния различных факторов риска на аварийность, оценка важности и степени их влияния показывают, что каждое происшествие имеет не одну, а несколько причин, одновременно воздействующих на процесс дорожно-го движения.

Ключевые слова: безопасность дорожного движения, транспортный риск, дорожно-транспортное происшествие, факторы аварийности, эпидемиологический анализ аварийности.

Введение. Описание и перечисление факторов, которые статистически значимо влияют на показатели аварийности, являются только началом поиска причин совершения дорожно-транспортных происшествий (ДТП). Можно ли более формализовано оценить степень влияния этих факторов на аварийность. В работе [1] встречаются мнения, что нет рациональных способов описания проблем безопасности дорожного движения и поиска оптимальных путей их решения. Так, например, наиболее актуальными проблемами считают риски перехода пешеходом дороги в неустановленном месте, управление в нетрезвом виде, движение в темное время суток, управление автомобилем неопытным водителем и т.д.

Перечислением подобных рисков можно охватить все аспекты безопасности дорожного движения (БДД). Трудность в том, что многие проблемы этого списка будут перекрываться. Проблема безопасности пешеходов – это частично проблема управления в нетрезвом виде, равно как и управление неопытным водителем и движение в темное время суток. Этот пример показывает сложность правильного определения факторов риска в БДД [2; 3].

Факторы риска, влияющие на показатели аварийности, взаимодействуют друг с другом, и механизм этого взаимодействия не совсем известен. Т.е. в классическом понимании научного подхода нет научного способа описания проблем БДД. Ранее проведенные исследования [4; 5], установившие статистически значимое влияние многих факторов риска на показатели аварийности, не дают окончательного ответа на вопрос о модели, определяющей количественную и качественную оценки ДТП и пострадавших в них. Рациональный подход к оценке важности факторов риска и степени их влияния на аварийность в дорожном движении (ДД) можно позаимствовать из концепции эпидемиологии.

Основная часть. Методика относительного сравнения факторов риска при исследовании пострадавших в ДТП методом эпидемиологического анализа. Причина обязательно предшествует следствию (аварии), при этом следствие можно назвать «эффектом», имея в виду возникновение ДТП и его различные исходы – материальный ущерб, смерть, ранение. По особенностям организации в эпидемиологическом анализе выделяют два основных типа наблюдательных аналитических исследований [4; 7]:

- случай–контроль (контрольные случаи);
- когортное исследование.

В данном случае возможно применить два направления (способа) поиска причин возникновения ДТП и его исходов:

- от следствия к причине (от эффекта к причине) (рисунок 1);
- от причины к следствию (от причины к эффекту) (рисунок 2).

Применяя метод «от следствия к причине», можно проследить ход событий в обратном направлении с целью найти в прошлом возможные причины настоящего события [8].

Изучение «от следствия к причине» – основа исследований «случай–контроль».

Другое направление поиска причины предусматривает прослеживание естественного (временного) хода событий, т.е. от предполагаемой причины к следствию (ДТП, тяжесть последствий). Такой подход является основой когортных исследований.

Согласно основному общенаучному правилу эпидемиологического анализа, каждое полноценное аналитическое исследование – наблюдательное или экспериментальное – должно иметь как минимум две сравниваемые группы – основную и контрольную. Способы формирования основных и контрольных групп определяются особенностями проведения аналитических исследований [8].

Рисунок 1. – Схема поиска причины способом «от следствия к причине»¹Рисунок 2. – Схема поиска причины способом «от причины к следствию»¹

Исследование «случай–контроль». В исследованиях «случай–контроль» вероятность существования причинно-следственной связи обосновывается не разной частотой ДТП, а различной распространенностью (встречаемостью) предполагаемого фактора риска в основной и контрольной группах.

В общем случае «генеральная совокупность в исследовании «случай–контроль» – это, прежде всего, та популяция, в которой выявляются случаи исследуемого исхода. Следовательно, на эту популяцию в целом воздействуют какие-то факторы риска, но до начала исследования факт влияния возможного фактора риска на отдельных субъектов (участников дорожного движения) популяции остается неизвестным»¹. Задача исследования – выявить эти факты влияния и оценить распространенность факторов риска в основной и контрольной группах наблюдения. В зависимости от изучаемой ситуации и рабочей гипотезы о факторах риска массив данных, обладающих набором общих характеристик (генеральная совокупность), как правило, ограничивается различными критериями включения (исключения)¹.

Когортное исследование разрабатывалось с целью выявления причин возникновения и распространения болезни в медицинских исследованиях. Это наиболее прямой путь к выявлению этиологии ДТП и количественной оценке риска влияния причинных факторов.

В зависимости от того, изучаются новые или архивные данные аварийности, различают два варианта когортных исследований. Если когорта сформирована в настоящее время и предполагается наблюдать ее в будущем, такой вариант называют проспективным, или параллельным, когортным исследованием.

Кроме того, когорту можно сформировать на основе архивных данных о воздействии факторов риска и проследить ее до настоящего времени. Такой вариант называют ретроспективным, или историческим, когортным исследованием. Поскольку случаи уже зарегистрированы, можно сразу после формирования когорты разделить ее по воздействию фактора риска на основную и контрольную группы. В течение выбранного периода эти группы прослеживаются по учету ДТП с целью выявления числа происшествий.

Сравнение когортного исследования и исследования «случай–контроль». Когортное исследование имеет простую, логичную структуру, предполагает исследование аварийности для экспонированных и неэкспонированных групп или каждой категории экспозиции. Такое планирование позволяет проводить как абсолютное, так и относительное сравнение аварийности экспонированной и неэкспонированной групп. Исследование «случай–контроль» предоставляет значительно меньше информации, в нем обычно возможна оценка только относительного риска. Кроме того, в данных исследованиях можно получать и абсолютные показатели, но только если известна доля выборки для наблюдений или исходный коэффициент аварийности для всей исследуемой генеральной совокупности. Доля выборки представляет собой отношение числа наблюдений к общей интенсивности транспортных средств, автомобиле-часы в движении или автомобиле-километры пробега в исследуемой группе [9].

На основе имеющихся данных – количество пострадавших в ДТП участников дорожного движения на дорогах г. Гомеля – может быть проведен только анализ пострадавших пешеходов по отношению ко всем другим участникам дорожного движения под воздействием различных внешних факторов. В нашем исследовании невозможно определить интенсивность пешеходов в определенный момент за все время исследования на доро-

¹ Исследование «случай–контроль» [Электронный ресурс]. URL: <http://medspecial.ru/wiki/Исследование+случай-контроль/>

гах г. Гомеля – таких данных не существует. Как метод проведения исследования будет применяться когортный анализ, т.к. имеющиеся данные удовлетворяют методике проведения данного вида анализа². В качестве когорты будет использоваться количество пострадавших в ДТП на дорогах г. Гомеля, полученное из данных по учету ДТП за пятилетний период; метод исследования – ретроспективное когортное исследование, т.к. анализ проводится на основе архивных данных.

При изучении степени влияния отдельных факторов среды на количество пострадавших необходим расчет абсолютного риска (R), связанного с каким-либо потенциальным фактором риска, который измеряет вероятность изучаемого эффекта у лиц, подверженных действию данного фактора (экспонированных к нему). Абсолютный риск рассчитывается по формуле

$$R = \frac{a}{v \cdot N}, \quad (1)$$

где a – число пострадавших, которые во время ДТП находились под действием исследуемого фактора;
($v \cdot N$) – автомобиле-километры пробега транспортных средств, находившихся под действием исследуемого фактора (v – скорость ТС; N – интенсивность движения ТС).

После измерения риска пострадавших в ДТП тех, на кого изучаемый фактор действует, и среди тех, на кого данный фактор не действует, проводят процедуру сравнения.

Для проведения количественного сравнения абсолютных рисков среди экспонированных и среди неэкспонированных рассчитывают относительный и атрибутивный риски.

Относительный риск – отношение риска получить повреждения в ДТП среди тех, на кого действовали различные факторы (Re), к риску среди неэкспонированных (Rne):

$$R = Re / Rne, \quad (2)$$

где Re – абсолютный риск у экспонированной группы;
 Rne – абсолютный риск у неэкспонированной группы.

При относительном сравнении факторов риска должны выполняться следующие утверждения:

- если значение относительного риска равно 1, то связь между фактором и ДТП отсутствует;
- если величина относительного риска больше 1, то риск стать участником ДТП возрастает;
- если величина относительного риска меньше 1, значит, риск ДТП экспонированной группы ниже, чем у тех, на кого изучаемый фактор не воздействовал.

Следовательно, данный фактор, вероятно, оказывает благоприятное воздействие на дорожно-транспортную обстановку [9].

Величина относительного риска позволяет измерить негативную силу условий, с которыми ассоциируется фактор риска, и показывает, во сколько раз риск пострадать в ДТП среди экспонированных больше по сравнению с неэкспонированными.

Доля экспозиции с фактором риска (PE) представляет собой долю всех случаев пострадавших в ДТП у экспонированных, обусловленную данным фактором. Доля экспозиции с фактором риска рассчитывается по формуле

$$PE = \frac{n}{\sum n} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где n – количество пострадавших в ДТП у экспонированной группы.

Доля экспозиции с фактором риска отражает удельный вес (долю) тех случаев ДТП, которые могли бы быть предотвращены при отсутствии влияния фактора риска. Другими словами, эта величина показывает, на сколько процентов может быть снижена частота ДТП при применении изучаемого вмешательства в ДД².

Атрибутивный риск (PAR) – количество пострадавших или других патологических состояний, которые можно связать с действием фактора. Определим атрибутивный риск:

$$PAR = \frac{PE(RR - 1)}{(PE(RR - 1)) + 1} \quad (4)$$

где PE – доля экспозиции с фактором риска;
 RR – относительный риск, связанный с ним³.

² Аналитические эпидемиологические исследования. Выявление и оценка факторов риска возникновения и распространения болезней [Электронный ресурс]. URL: <http://pandia.ru/text/79/568/53515.php>

³ Причинно-следственная модель [Электронный ресурс]. URL: <http://epidemiolog.org/opredeliteli-riska-i-prichiny-zabolevaniya/prichinno-sledstvennaya-model-ii>

С точки зрения безопасности дорожного движения, результатом такого расчета является число несчастных случаев, что объясняется особым фактором риска, и, следовательно, ожидаемое уменьшение количества аварий, что может быть достигнуто, если фактор риска был бы устранен. Результат представляет собой значение между 0 и 1.

Данный показатель демонстрирует абсолютное увеличение пострадавших в связи с действием данного фактора (рисунок 3).

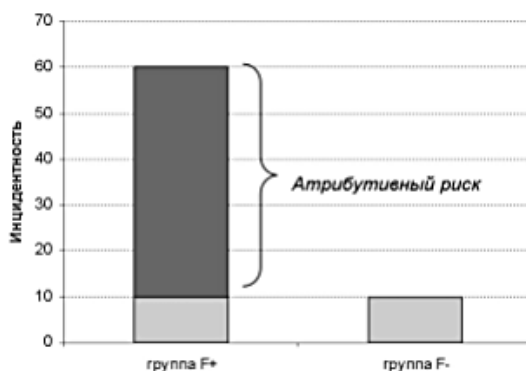


Рисунок 3. – Атрибутивный риск в основной группе [3]

Для более полной оценки различий показателей используют дополнительную величину, называемую *этиологической долей* (etiological fraction – EF). Этиологическая доля рассчитывается по формуле

$$EF = \frac{RR - 1}{RR} \cdot 100\% . \quad (5)$$

Этиологическая доля отражает удельный вес (долю) тех случаев ДТП, которые могли бы быть предотвращены при отсутствии влияния фактора риска. Другими словами, эта величина показывает, на сколько процентов может быть снижена частота ДТП при применении изучаемого вмешательства в ДД⁴. Изучить совместное влияние факторов можно с помощью причинно-следственной связи.

Причинно-следственная модель. Достаточной причиной является та, которая неизбежно приводит к определенным последствиям. Единичные причины происшествия редко бывают достаточными. Причина, не являющаяся достаточной сама по себе, называется *дополнительной* причиной. *Необходимая* причина – та, наличие которой для возникновения ДТП обязательно^{4,5}.

Изображенная на рисунке 4 модель схематически показывает, как несколько дополнительных причин (секторов) совместно формируют достаточную причину (круг). На рисунке показано также, что ДТП может иметь несколько достаточных причин и они могут иметь одну или несколько общих дополнительных причин. Такая причина, как А, представляющая собой элемент всех достаточных причин, является необходимой.



Рисунок 4. – Схематическое описание причин возникновения ДТП

Каждая отдельная причина аварийности имеет соответствующую этиологическую долю *EF*. Этот показатель представляет собой процент тех случаев аварийности, которые обусловлены воздействием этой причины; иначе говоря, процент всех случаев аварийности, которые не произошли бы, если бы данная причина была исключена.

⁴ Аналитические эпидемиологические исследования. Выявление и оценка факторов риска возникновения и распространения болезней [Электронный ресурс]. URL: <http://pandia.ru/text/79/568/53515.php>

⁵ Причинно-следственная модель [Электронный ресурс]. URL: <http://epidemiolog.org/opredeliteli-riska-i-prichiny-zabolevaniya/prichinno-sledstvennaya-model-ii>

Сумма этиологических долей для всех достаточных причин всегда равна 100%, т.е.

$$EF(I) + EF(II) + EF(III) = 100\%.$$

Этиологическая доля дополнительной причины равна этиологической доле достаточной причины или причин, элементом которой она является³.

Исследование влияния факторов внешней среды на аварийность в Гомеле методом эпидемиологического анализа. Проведенные исследования позволили выделить ряд факторов, влияющих на общее количество ДТП, число погибших и раненых. Из них были выделены статистически значимые, влияющие на итоговый результат, и приведены оценки средних в различных группах [2]. Из дальнейшего рассмотрения исключены факторы, для которых установлено незначительное влияние на количество и степень тяжести ДТП, о чем свидетельствуют результаты статистических исследований. Количество пострадавших при воздействии фактора «освещение» приведено в таблице 1.

Таблица 1. – Количество пострадавших при воздействии фактора «освещение»

Пострадавшие	Освещение				Всего
	светло	включено	не включено	отсутствует	
Погибло	58	47	13	7	125
Ранено	645	461	74	33	1213
Всего	703	508	87	40	1338

Автомобиле-километры пробега транспортных средств, находившиеся под влиянием фактора «освещение», приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Автомобиле-километры пробега транспортных средств

Освещение	Автомобиле-километры	
	фактор есть	фактор отсутствует
Светло	285018935	569933743
Включено	234744920	620207757
Не включено	171366218	683586459
Отсутствует	163822604	691130073

Выполним необходимые расчеты.

Абсолютный риск для неэкспонированной группы:

– погибшие

$$R_{ne} = \frac{58}{285018935} = 2,03 \cdot 10^{-7};$$

– раненые

$$R_{ne} = \frac{645}{285018935} = 2,26 \cdot 10^{-6}.$$

Абсолютный риск для экспонированной группы:

– погибшие

$$R_{ne} = \frac{47}{23474920} = 2 \cdot 10^{-7};$$

– раненые

$$R_{ne} = \frac{461}{23474920} = 1,96 \cdot 10^{-6}.$$

Относительный риск:

– погибшие

$$RR = \frac{2,03 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 10^{-7}} = 1,02;$$

– раненые

$$RR = \frac{2,26 \cdot 10^{-6}}{1,96 \cdot 10^{-6}} = 1,15.$$

Таким образом, риск пострадать в темное время суток при включенном освещении выше, чем аналогичный риск, рассчитанный для светлого времени суток. Полученные данные позволяют предположить, что темное время суток и включенное освещение является фактором риска.

Доля экспозиции с фактором риска (освещение включено):

– погибшие

$$RE = \frac{125}{47} 100\% = 38\% ;$$

– раненые

$$RE = \frac{1213}{471} 100\% = 38\% .$$

Атрибутивный риск составил:

– погибшие

$$PAR = \frac{0,38(1,02-1)}{0,38(1,02-1)+1} = 0,01 ;$$

– раненые

$$PAR = \frac{0,38(1,15-1)}{0,38(1,15-1)+1} = 0,05 .$$

Данные факторы показывают абсолютное увеличение пострадавших у экспонированной группы, обусловленное действием фактора.

Этиологическая доля (снижение относительного риска – COP);

– погибшие

$$EF = \frac{1,02-1}{1,02} = 0,01 ;$$

– раненые

$$EF = \frac{1,15-1}{1,15} = 0,05 .$$

Этот результат означает, что в 1% случаев для погибших и в 5% случаев для раненых попадание в ДТП в темное время суток был бы сокращено, если бы был исключен фактор «темное время суток, освещение включено». Остальные расчеты когортного анализа ДТП с участием пешеходов по каждому исследуемому фактору приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3. – Результаты когортного анализа погибших в ДТП с участием пешеходов на дорогах

Воздействие фактора		Абсолютный риск $R, 10^{-7}$	Относительный риск RR	Доля экспозиции с фактором риска PE	Этиологическая доля EF
1		2	3	4	5
Освещение	Светло	2,03	1,00	0,46	0,00
	Освещение включено	2,00	1,02	0,38	0,01
	Освещение не включено/неисправно	0,76	2,68	0,10	0,15
	Освещение отсутствует	0,43	4,76	0,06	0,17
Состояние покрытия	Сухое	2,68	1,00	0,560	0,00
	Мокрое	1,76	1,52	0,352	0,16
	Гололедица	0,26	10,16	0,016	0,13
	Снежный накат	0,10	27,26	0,016	0,30
	Противогололедный материал при гололеде	0,03	78,96	0,008	0,38
	Противогололедный материал при снежном накате	0,12	23,15	0,024	0,35
	Заснеженное	0,10	26,49	0,016	0,29
	Загрязненное	0,07	37,49	0,008	0,23
Профиль дороги	Горизонтальный прямой участок	4,5	1,00	0,920	0,00
	Вершина подъема	0,004	120,79	0,008	0,49
	Кривая в плане	0,004	103,37	0,008	0,45
	Кривая в профиле	0,004	116,12	0,008	0,48
	Уклон (подъем)	0,004	104,03	0,008	0,45
	Уклон (спуск)	0,01	38,12	0,024	0,47
	Прочее	0,03	14,28	0,024	0,24

Окончание таблицы 3

	1	2	3	4	5
Погодные условия	Ясно	2,41	1,00	0,504	0,00
	Пасмурно	1,82	1,33	0,368	0,11
	Туман	0,002	100,93	0,024	0,71
	Дождь	0,04	5,70	0,080	0,27
	Снег	0,01	28,11	0,016	0,30
	Прочее	0,003	74,10	0,008	0,37
Скорость движения	30–40	0,03	1,00	0,032	0,00
	41–50	0,05	0,60	0,096	-0,04
	51–60	3,99	0,08	0,832	-3,33
	Свыше 60	0,03	0,94	0,040	0,00

Таблица 4. – Результаты когортного анализа раненых в ДТП с участием пешеходов

Воздействие фактора		Абсолютный риск R , 10^{-7}	Относительный риск RR	Доля экспозиции с фактором риска PE	Этиологическая доля EF
Освещение	Светло	22,6	1,00	0,53	0,00
	Освещение включено	19,6	1,15	0,38	0,05
	Освещение не включено/неисправно	4,32	5,24	0,06	0,21
	Освещение отсутствует	2,01	11,23	0,03	0,22
Состояние покрытия	Сухое	27,13	1,00	0,585	0,00
	Мокрое	17,12	1,58	0,353	0,17
	Гололедица	0,66	41,17	0,004	0,14
	Снежный накат	0,44	61,35	0,007	0,31
	Противогололедный материал при гололеде	0,54	49,98	0,013	0,39
	Противогололедный материал при снежном накате	0,93	29,30	0,020	0,36
	Заснеженное	1,01	26,83	0,016	0,30
	Загрязненное	0,14	189,87	0,002	0,24
Профиль дороги	Горизонтальный прямой участок	46,06	1,00	0,970	0,00
	Вершина подъема	0,004	1236,21	0,001	0,50
	Кривая в плане	0,04	117,55	0,007	0,46
	Кривая в профиле	0,04	132,06	0,007	0,49
	Уклон (подъем)	0,01	532,35	0,002	0,47
	Уклон (спуск)	0,04	106,41	0,009	0,49
	Прочее	1,26	36,53	0,010	0,26
Погодные условия	Ясно	22,18	1,00	0,477	0,00
	Пасмурно	16,94	1,31	0,354	0,10
	Туман	0,03	68,88	0,006	0,28
	Дождь	6,26	3,54	0,122	0,24
	Снег	1,42	15,66	0,027	0,29
	Прочее	0,06	40,06	0,014	0,35
Скорость движения	30–40	0,07	1,00	0,007	0,00
	41–50	6,97	0,10	0,137	-0,14
	51–60	39,28	0,02	0,844	-4,87
	Свыше 60	0,09	0,76	0,012	0,00

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что ключевыми факторами, оказывающими воздействие на летальные исходы в результате ДТП с участием пешеходов на дорогах г. Гомеля, являются: «темное время суток, освещение отсутствует», «противогололедный материал при гололеде», «вершина подъема», «туман».

Данный вывод основывается на полученных результатах этиологических долей и показателе относительного риска, которые показывают негативную силу условий, с которыми ассоциируется фактор риска, и во сколько раз риск летального исхода среди экспонируемых больше по сравнению с неэкспонируемыми. Чем больше значение этиологической доли, тем больший эффект влияния фактора.

Опираясь на данное утверждение, можно предполагать, что наибольшее влияние на количество погибших в ДТП с участием транспортных средств на дорогах оказывают факторы: «туман» ($EF = 71\%$), «вершина подъема» ($EF = 49\%$), «противогололедный материал при гололеде» ($EF = 38\%$), «освещение отсутствует» ($EF = 17\%$). Все остальные факторы также оказывают значительное влияние.

Полученные значимые факторы были исследованы независимо друг от друга. Совместное воздействие определяющих факторов на летальный исход в ДТП с пешеходами может быть изучено с помощью построения причинно-следственной модели.

Полученные значения этиологических долей показали, что наибольшее влияние на риск получить травмы в ДТП с участием транспортных средств на дорогах оказывают следующие факторы: «темное время суток, освещение отсутствует», «противогололедный материал при гололеде», «вершина подъема», «весна», «снег». Все факторы рассматривались независимо друг от друга.

По полученным результатам можно заметить некоторые различия с данными, полученными при исследовании влияния данных факторов на риск летального исхода в ДТП данной категории. Наибольшее влияние на количество раненых в ДТП оказывают факторы: «вершина подъема» ($EF = 50\%$), «противогололедный материал при гололеде» ($EF = 39\%$), «снег» ($EF = 29\%$), «освещение отсутствует» ($EF = 22\%$). Все остальные факторы также оказывают значительное влияние.

Построение причинно-следственной модели. Факторы, влияющие на ДТП с пешеходами:

- погодные условия: 1 – ясно; 2 – пасмурно; 3 – туман; 4 – дождь; 5 – снег; 6 – прочее (погодные условия);
- состояние покрытия: 7 – сухое; 8 – мокрое; 9 – гололедица; 10 – снежный накат; 11 – противогололедный материал при гололеде; 12 – противогололедный материал при снежном накате; 13 – заснеженное; 14 – загрязненное;
- профиль дороги: 15 – горизонтальный прямой участок; 16 – вершина подъема; 17 – кривая в плане; 18 – кривая в профиле; 19 – уклон (подъем); 20 – уклон (спуск); 21 – прочее (профиль дороги);
- освещение: 22 – светлое время суток; 23 – освещение включено; 24 – освещение не включено/неисправно; 25 – освещение отсутствует;
- время года: 26 – весна; 27 – осень; 28 – зима; 29 – лето;
- скорость движения: 30 – скорость 31–40 км/ч; 31 – скорость 41–50 км/ч; 32 – скорость 51–60 км/ч; 33 – скорость свыше 60 км/ч.

Для определения достаточных причин ДТП выбираем те факторы, этиологическая доля которых в сумме равна 100% (или 1). Данные указаны в таблице 5.

Таблица 5. – Достаточные причины, необходимые для совершения ДТП с погибшими

Достаточная причина	Факторы ДТП с пешеходами	Значение факторов
I	3, 10	туман, снежный накат
II	3, 13	туман, заснеженное покрытие
III	4, 9, 17, 24	дождь, гололедица, кривая в плане, освещение не включено/неисправно

Согласно таблице, для совершения ДТП нужно одновременное наличие нескольких факторов. Соответственно, исключение одного из них практически исключит вероятность возникновения ДТП с пешеходами.

Рассмотрим некоторые достаточные причины, присутствие факторов в которых может повлиять на возникновение ДТП с погибшими (рисунок 5).

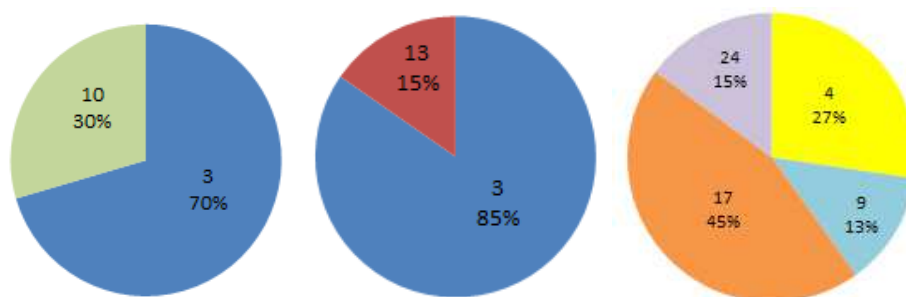


Рисунок 5. – Достаточные причины, необходимые для совершения ДТП с погибшими

Для построения причинно-следственной модели определим достаточные причины ДТП с ранеными. Данные указаны в таблице 6.

Рассмотрим некоторые достаточные причины для совершения ДТП с ранеными (рисунок 6).

Если из представленных на рисунках 5 и 6 достаточных причин исключить какой-либо фактор, то условия для возникновения ДТП будут отсутствовать.

Таблица 6. – Достаточные причины, необходимые для совершения ДТП с ранеными

Достаточная причина	Факторы ДТП с пешеходами	Значение факторов
I	3, 8, 18, 23	туман, мокрое покрытие, кривая в профиле, освещение включено
II	4, 13, 17	дождь, заснеженное покрытие, кривая в профиле
III	5, 8, 20, 23	снег, мокрое покрытие, уклон (спуск), освещение включено

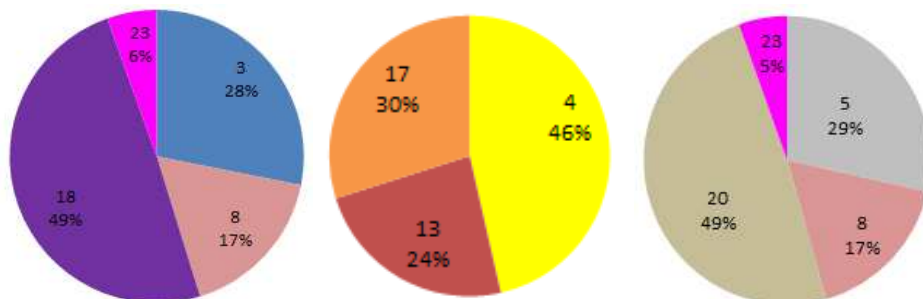


Рисунок 6. – Достаточные причины, необходимые для совершения ДТП с ранеными

Закключение. Выявление этиологических долей различных факторов риска может использоваться не только при изучении достаточных, необходимых и дополнительных причин возникновения ДТП. Сравнение значений этиологической доли различных факторов риска показывает количественную оценку каждого из этих факторов в показателе аварийности.

Основные аспекты применения этиологического риска для оценки вклада проблем БДД в аварийность:

- есть много факторов, для которых невозможно достоверно оценить этиологический риск. Например, невнимательность, очевидно, является фактором риска. Однако невозможно определить какую долю общей экспозиции (передвижений) участники ДД проводят в невнимательном состоянии;

- зачастую факторы риска коррелируют, но механизм такой корреляции не совсем понятен. В большинстве случаев будет неверным сложить этиологический риск двух факторов, чтобы оценить их суммарный вклад в аварийность;

- некоторые проблемы БДД невозможно описать оценкой риска. Так, например, дети не имеют повышенного риска пострадать в ДТП по сравнению со взрослыми. В то же время очевидно сильное желание обеспечить более высокий уровень БДД для детей, чем для иных категорий участников ДД. Поэтому, пока есть дорожно-транспортный травматизм с участием детей, риск ДТП с их участием всегда будет одной из основных проблем, несмотря на то, что этиологический риск для них не является наибольшим по сравнению с другими проблемами в БДД;

- ДТП и их последствия не полностью определены в официальных отчетах.

Данный метод достаточно сложен в реализации, поскольку в материалах о ДТП не хватает дополнительных сведений, которые создают достаточную причину возникновения ДТП, например, видимость в направлении движения, коэффициент сцепления, замедление автомобиля и пр. Официальная статистика, к сожалению, содержит обобщенную информацию о случившемся происшествии. Несмотря на приведенные проблемы, концепция этиологического риска полезна для оценки важности различных проблем БДД и будет использована для разработки проактивной системы обеспечения безопасности дорожного движения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скирковский, С.В. Построение иерархической системы индикаторов для комплексной оценки аварийных ситуаций // С.В. Скирковский, А.Б. Невзорова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2021. – № 3(43). – С. 21–28.
2. Евтюков, С.А. Дорожно-транспортные происшествия: расследование, реконструкция, экспертиза : учеб.-практ. пособие / С.А. Евтюков, Я.В. Васильев. – СПб. : ДНК, 2008. – 390 с.
3. Рунэ, Эльвик. Справочник по безопасности дорожного движения : [пер. с норв.] / Рунэ Эльвик, Аннэ Боргер Мюсен, Трулс Ваа ; под ред. проф. В.В. Сильянова. – М. : МАДИ (ГТУ), 2001. – 754 с.
4. Методика оценки риска здоровью населения факторов среды обитания : инструкция по применению / В.П. Филонов [и др.] ; под общ. ред. В.П. Филонова. – Минск : Респ. науч.-практ. центр гигиены, 2012. – 23 с.
5. Скирковский, С.В. Оценка безопасности дорожного движения на этапах проектирования транспортной сети / С.В. Скирковский, А.Б. Невзорова // Проблемы безопасности на транспорте : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. /

- М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж.-д. Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю.И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2019. – Ч. 1. – С. 73–75.
6. Скирко́вский, С.В. Факторный анализ последствий ДТП в Гомельской области / С.В. Скирко́вский, А.Б. Невзорова // Проблемы безопасности на транспорте : материалы X Междунар. науч.-практ. конф. В 5 ч. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж.-д. Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю.И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2020. – Ч. 3. – С. 58–60.
7. Флетчер, Р. Клиническая эпидемиология : [пер. с англ.] / Р. Флетчер, С. Флетчер, Э. Вагнер. – М. : Медиа Сфера. 2004. – 352 с.
8. Палтышев, В.И. Аналитические эпидемиологические исследования / И.П. Палтышев; В.И. Покровский ; под ред. В.И. Покровского. – М. : Моск. мед. акад. им. И.М. Сеченова, 2002. – 78 с.
9. Rune, Elvik. The handbook of road safety measures / Rune Elvik, Alena Høyе. – Second edition. – Emerald Group Publishing Limited, 2009. – Pp. 1117.

REFERENCES

1. Skirkovskij, S.V., & Nevzorova A.B. (2021). Postroenie ierarhicheskoj sistemy indikatorov dlya kompleksnoj ocenki avarijnyh situacij [Construction of a hierarchical system of indicators for a comprehensive assessment of emergency situations]. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta [Herald of Polotsk State University]*, 3(43), 21–28. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Evtjukov, S.A., & Vasil'ev A.V. (2008). *Dorozhno-transportnye proisshestiya: rassledovanie, rekonstrukcija, ekspertiza [Road accidents: investigation, reconstruction, examination]*. Saint Petersburg: DNK. (In Russ.).
3. Rune, El'vik, Myusen, Anne Borger, & Vaa, Truls. (2001). *Spravochnik po bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya [Road Safety Handbook]*. Moscow: MADI (GTU). (In Russ.).
4. Filonov V.P., Naumenko T.E., Sokolov S.M., Gricenko T.D., Shevchuk L.M., Pshegroda A.E., & Gan'kin A.N. (2012). *Metodika ocenki riska zdorov'yu naseleniya faktorov sredy obitaniya. Instrukcija po primeneniju [Methodology for assessing the risk to the health of the population of environmental factors]*. Minsk : Respublikanskij nauchno-prakticheskij centr gigieny. (In Russ.).
5. Skirkovskij, S.V., & Nevzorova A.B. (2019). Ocenka bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya na etapah proektirovaniya transportnoj seti [Road safety assessment at the design stages of the transport network]. *Problemy bezopasnosti na transporte [Transport security issues]*, Vol. 1, 73–75. Gomel': Belorusskij gosudarstvennyj universitet transporta. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Skirkovskij, S.V., & Nevzorova A.B. (2020). Faktornyj analiz posledstvij DTP v Gomel'skoj oblasti [Factor analysis of the consequences of an accident in the Gomel region]. *Problemy bezopasnosti na transporte [Transport security issues]*, Vol. 3, 58–60. Gomel': Belorusskij gosudarstvennyj universitet transporta. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Fletcher, R., Fletcher, S., & Vagner, E. (2004). *Klinicheskaya epidemiologiya [Clinical epidemiology]*. Moscow: Media Sfera. (In Russ.).
8. Paltyshev, V.I., & Pokrovskij, V.I. (2002). *Analiticheskie epidemiologicheskie issledovaniya [Analytical epidemiological studies]*. Moscow: Moscow Medical Academy named after I.M. Sechenov. (In Russ.).
9. Rune, Elvik, & Høyе, Alena. (2009). *The handbook of road safety measures*. Emerald Group Publishing Limited. (In Russ.).

Поступила 09.11.2021

INVESTIGATION OF THE CAUSES OF ACCIDENTS
BY THE METHOD OF EPIDEMIOLOGICAL ANALYSIS

S. SKIRKOUSKI

It is proposed to apply the method of epidemiological analysis, which is widely used in medical investigations, to establish the causes of road traffic accidents. The nature of the influence of various risk factors on the accident rate, the assessment of the importance and degree of their influence show that each incident has not one, but several causes simultaneously affecting the process of traffic.

Keywords: road safety, transport risk, traffic accident, accident factors, epidemiological analysis of accidents.

УДК 656

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СРЕДСТВ И ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

д-р техн. наук, доц. Д.В. КАПСКИЙ, Д.В. ЛЕВАНОВИЧ
(Белорусский национальный технический университет, Минск),
канд. техн. наук, доц. Т.В. ВИГЕРИНА
(Полоцкий государственный университет),
д-р техн. наук, проф. А.К. ГОЛОВНИЧ
(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)

Обоснованы необходимость и возможность применения программно-аппаратного комплекса «RoadEye S01» производства СЗАО «Безопасные дороги Беларуси» в Республике Беларусь (ТУ ВУ 191694101.001-2019) на улицах городов с протяженностью перегонов около 1500 м с погрешностью измерения времени ± 1 с. Контроль скоростных ограничений рекомендуется проводить через замер средней скорости проезда транспортным средством участка улицы (автомобильной дороги) на контрольных зонах.

Контроль средней скорости проезда участка улицы для наиболее эффективного обеспечения БДД следует производить без обозначения предупреждающими дорожными знаками 1.36 «Контроль режима движения» или с применением нового типа информационно-указательных дорожных знаков 5.44 «Начало зоны контроля средней скорости» и 5.45 «Конец зоны контроля средней скорости». Дорожный знак начала зоны контроля может применяться совместно с дорожным знаком 3.24.1 «Ограничение максимальной скорости».

Полученные сведения по результатам функционирования пилотной зоны, макет доказательной базы и сертификат Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь № 13812 о регистрации средства измерений (допуск к применению в Республике Беларусь с 29 октября 2020 г.) свидетельствуют о готовности применения комплекса «RoadEye S01» на УДС в Республике Беларусь.

Ключевые слова: транспортное средство, скорость движения, ограничения, средства контроля, процесс контроля.

Введение. Нормативные документы^{1,2} и результаты предыдущих исследований, связанные с безопасностью дорожного движения³ [1–3], требуют развития применения средств и процессов определения скорости движения транспортных средств с выявлением водителей-нарушителей скоростных ограничений и наказанием последних.

Цель работы – опытное апробирование технологии и средств фиксации нарушений скоростных ограничений методом вычисления средней скорости движения на участке улицы. В ходе выполнения проекта решались следующие задачи:

- проверка процесса распознавания государственных регистрационных знаков транспортных средств и соответствие круглосуточному режиму работы (без надзора);
- формирование макета доказательной базы по административным правонарушениям;
- проверка соответствия применяемых приборов требованиям технологичности, совместимости, надежности, метрологическому и аппаратно-программному обеспечению;
- формирование общих требований для организации зон контроля средней скорости движения с учетом полученных результатов (статистики) по пилотной зоне.

Основная часть. *Общее описание пилотного проекта и зоны его проведения.* Исследования проводились в сентябре–декабре 2020 г. в рамках договора о сотрудничестве между ГУВД Мингорисполкома и СЗАО «Безопасные дороги Беларуси». Пилотная зона организована на участке ул. Ольшевского (от дома № 61 до дома № 59). Исследуемый участок улицы включает в себя:

- регулируемое пересечение с пер. 6-й Путепроводный;
- регулируемый пешеходный переход напротив дома № 61;

¹ О мерах по повышению безопасности дорожного движения [Электронный ресурс] : Указ Президента Респ. Беларусь, 28 нояб. 2005 г., № 551. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=p30500551>

² Процессуально-исполнительный кодекс Республики Беларусь об административных правонарушениях [Электронный ресурс] : Кодекс Респ. Беларусь, 20 дек. 2006 г., № 194-3. URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=hk0600194>

³ Тестирование измерителей средней скорости. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kurier.lt/testirovanie-izmeritelej-srednej-skorosti/>

- нерегулируемое пересечение с пер. 8-й Путепроводный;
- выезды с прилегающих территорий (4 ед.);
- остановочные пункты маршрутного пассажирского транспорта (2 ед.).

Основная транспортная функция ул. Ольшевского в пределах исследуемого участка заключается в распределении транспортных потоков со 2-го городского транспортного кольца (просп. Пушкина) в сторону жилых микрорайонов «Масюковщина-1», «Раковское шоссе-7» и «Раковское шоссе-3» (до ул. П. Глебки). Протяженность ул. Ольшевского составляет 2,9 км, протяженность пилотной зоны – 339 м, а контролируемая для замера средней скорости движения протяженность участка улицы – 300 м. Основными объектами притяжения в исследуемой зоне ул. Ольшевского являются: Минская городская поликлиника № 12 (дом № 6); ГУО «Средняя школа № 81 г. Минска» (дом № 70); ГУО «Средняя школа № 128 г. Минска» (дом № 59); ГУО «Ясли-сад № 411 г. Минска» (дом № 74А); остановочные пункты маршрутного пассажирского транспорта «Поликлиника № 12» и «Данилы Сердича»; парк культуры и отдыха районного значения «Парк 60-летия Великого Октября».

Движение на участке пилотной зоны по ул. Ольшевского организовано по двум полосам в обоих направлениях, ширина каждой из полос составляет 5,25 м (рисунок 1).

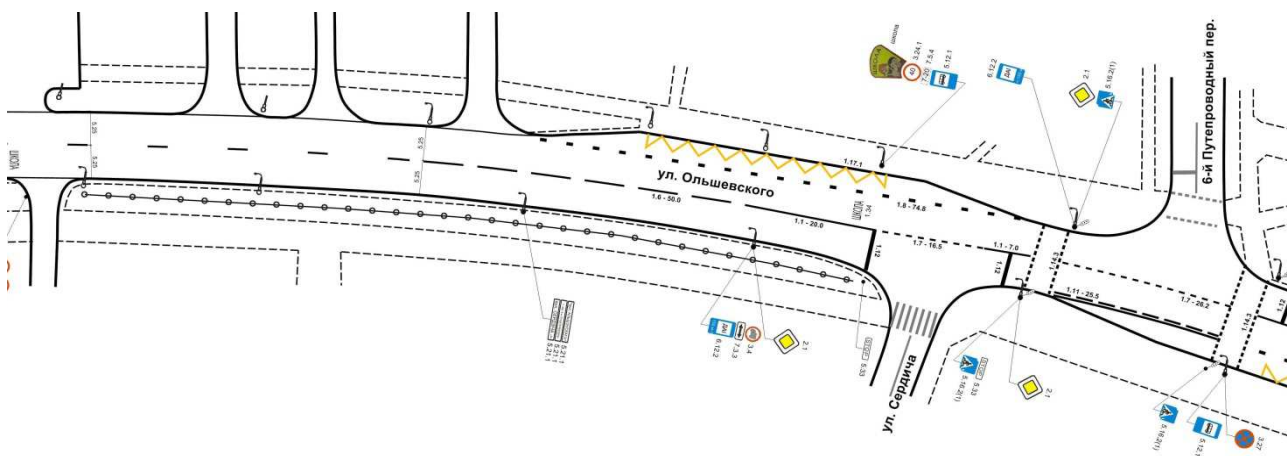


Рисунок 1. – Схема организации дорожного движения в пилотной зоне

В соответствии с п. 5.1.1 ТКП 45-3.03-227-2010, *а* расчетная скорость движения транспортных средств для категории Ж2 в свободных условиях составляет 60 км/ч. Максимальная разрешенная скорость движения транспорта в зоне проведения пилотного проекта по ул. Ольшевского с 7 до 20 ч ограничена значением 40 км/ч, в остальное время согласно ПДД – 60 км/ч.

Исследуемый участок ул. Ольшевского выполнен с покрытием проезжей части асфальтобетоном, дорожная разметка – из дорожно-разметочной эмали, дорожные знаки установлены 3-го типоразмера со световозвращающей поверхностью класса 1Б по СТБ 1140-2013. По четной стороне участка пилотной зоны преобладает высотная жилая застройка, по нечетной – частная усадебная, что повлияло на сформировавшиеся зоны осуществления остановки и стоянки транспортных средств на проезжей части гражданами, проживающими или работающими в указанном квартале – напротив дома № 59 по ул. Ольшевского (ГУО «Средняя школа № 128 г. Минска»).

Технология контроля средней скорости. Апробирование технологии и средств фиксации нарушений скоростных ограничений методом вычисления средней скорости движения на участке ул. Ольшевского применялся комплекс программно-аппаратный «RoadEye S01» (далее – КПА) производства СЗАО «Безопасные дороги Беларуси» в Республике Беларусь (ТУ BY 191694101.001-2019).

Конструктивно КПА состоит из вычислительного блока и видеомодуля. На корпусе вычислительного блока расположены герметичные разъемы для подключения кабелей электропитания, передачи данных и антенн. Видеомодуль выполнен в ударопрочном и пылевлагозащитном термокожухе с регулировочным кронштейном и содержит: IP-камеру типа Vivotec LPC с разрешением от 2-х мегапикселей и выше, передающую видеопоток по протоколу rtsp; инфракрасный прожектор с регулируемым углом подсветки (10–30°) и длиной волны 850 нм, с дальностью подсветки объекта не менее 50 м. КПА работает в непрерывном режиме и стационарно размещается на опорах, стойках и других элементах обустройства автомобильных дорог и улиц (рисунок 2).

Вычислительный блок выполнен в виде навесного электротехнического шкафа, защищенного от пыли и влаги, в котором располагается следующее оборудование:

- промышленное устройство обработки информации со встроенным ГЛОНАСС/GPS-модулем и установленным программным обеспечением для приема, обработки и хранения информации, оснащенное сетевыми интерфейсами для подключения IP-камеры и оборудования передачи данных, а также GPS-антенны. Устрой-

ство оснащено накопителем для записи и хранения сформированных файлов, объем памяти позволяет хранить одновременно не менее 20 000 файлов;

- беспроводной сотовый маршрутизатор 3G с интерфейсами ethernet – для передачи информации посредством сетей сотовых операторов;

- преобразователь напряжения 24В/12В с номинальным входным напряжением 24 В, выходным напряжением 12 В, максимальным выходным током не менее 5А – для электропитания промышленного устройства обработки информации и беспроводного 3G маршрутизатора.



Рисунок 2. – Размещение видеомодуля на опоре уличного освещения

Принцип действия КПА основан на получении информации о видеопотоке от IP-камер, установленных на входе и выходе контрольной зоны, и значений времени и координат от встроенного в КПА приемника сигналов глобальной спутниковой системы (рисунок 3).



Рисунок 3. – Расположение 1-й (дом № 59) и 2-й точек контроля (дом № 61) на ул. Ольшевского

После получения данных о времени и координатах формируется файл с изображением государственных регистрационных знаков транспортных средств и данных о текущем времени и местоположении КПА, которое определяется в момент распознавания государственных регистрационных знаков транспортных средств (макет доказательной базы). Файлы сохраняются во внутреннюю память КПА в формате JPG и могут быть переданы конечному потребителю информации по проводным или беспроводным (сотовая связь) каналам связи.

КПА «RoadEye S01» (ТУ ВУ 191694101.001-2019) в ходе реализации пилотного проекта был зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под номером РБ 03 23 7790 20 и допущен к применению в Республике Беларусь с 29 октября 2020 г. (сертификат Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь № 13812).

Расчет средней скорости V_{cp} проезда 300-метровой контрольной зоны определяется по формуле

$$V_{cp} = \frac{S_0}{t_0},$$

где S_0 – длина контрольной зоны;

t_0 – время движения автомобиля в пределах контрольной зоны с учетом допустимой абсолютной погрешности ± 3 с.

Основные метрологические и технические характеристики КПА «RoadEye S01», контролируемые при проведении ежегодных испытаний и поверок, приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Основные метрологические и технические характеристики комплекса

Наименование характеристики	Значение характеристики
<i>Основные технические характеристики</i>	
Ширина зоны контроля, м (не менее)	11
Удаленность зоны контроля от камеры, м	от 10 до 50
Высота установки камеры КПА, м	от 3 до 8
Масса вычислительного блока, кг	36
Габаритные размеры вычислительного блока (шкаф электротехнический навесной), без крепежных элементов, мм	500×500×250
Высота установки вычислительного блока, м	от 3 до 4
Рабочий диапазон температур, °С	от -30 до +50
Относительная влажность при температуре 25 °С, %	До 90
Атмосферное давление, Па	от 86000 до 106700
Напряжение питания от источника постоянного тока, В	24
Потребляемая мощность видеомодуля, Вт	110
Потребляемая мощность вычислительного блока (без подключенных видеомодулей), Вт	50
Степень защиты вычислительного блока и видеомодуля, по ГОСТ 14254 (не менее)	IP54
Длина кабеля (патч-корда) от цифровой IP камеры до вычислительного блока, м	5
<i>Метрологические характеристики</i>	
Пределы допускаемой абсолютной погрешности формирования шкалы времени КПА от Национальной шкалы времени в режиме синхронизации, с	± 3
Пределы допускаемой абсолютной погрешности определения координат места установки КПА, м	± 12
<i>Программное обеспечение</i>	
Название и сборка (версия программного обеспечения)	NumberOK 3.2.3.260-UNI
Степень защиты программного обеспечения по СТБ OIMLD 31-2015	I

Комплектность комплекса «RoadEye S01» (ТУ BY 191694101.001-2019) следующая:

- видеомодуль (видеокамера типа Vivotec LPC, влагозащитный кожух, кронштейн крепления, ИК-подсветка);
- вычислительный блок (промышленное устройство обработки информации со встроенным GPS-модулем, антенна GPS, преобразователь 24/12В, программное обеспечение NumberOK);
- паспорт;
- руководство по эксплуатации;
- методика поверки.

Анализ результатов реализации пилотной зоны. В ходе реализации пилотной зоны на участке ул. Ольшевского по опытной эксплуатации комплекса «RoadEye S01» для фиксации нарушений средней скорости проезда был сформирован макет доказательной базы (с метрологическими характеристиками) для вынесения постановления о наложении административного взыскания по делам об административных правонарушениях за превышение лицом, управляющим транспортным средством, установленной скорости движения (рисунки 4 и 5).

На фотографии (файл в формате JPG) с изображением государственных регистрационных знаков транспортных средств указываются метрологические характеристики, которые формируются в виде штампа в нижней части кадра и содержат: дату; время; координаты; статус подключения к спутникам (OK или FAIL); распознанный государственный регистрационный знак; тип КПА; серийный номер КПА.

На рисунке 6 представлен график изменения количества нарушителей установленной скорости от общего числа проезжающих за каждый день в октябре–ноябре 2020 г.

На организованной пилотной зоне контроля средней скорости движения транспортных средств за период ее функционирования (сентябрь–декабрь 2020 г.) были получены статистические результаты по превышениям установленной скорости и общему количеству проездов. В таблице 2 приведены данные за октябрь и ноябрь.

Согласно таблице 2 и рисунку 6, в среднем в сутки выявлено 8,17% нарушителей от общего числа проезжающих, при этом в выходные дни возрастает количество нарушителей по отношению к будним дням (с 6,7% до 11,4% в октябре и с 7,5% до 11,0% в ноябре) при общем снижении количества проезжающих по выходным дням в октябре на 47,5% и в ноябре на 42,0%.

Максимальная средняя скорость движения в выходные дни (в субботу 21.11.2020 в 15⁰⁶) зафиксирована 93 км/ч, в будние дни (в понедельник 23.11.2020 в 13⁴⁶) – 85 км/ч.

Фиксация ТС на первой контрольной точке

Номер ТС: 1555ТХУ7

Время: 16.11.2020 13:34:43

Место: г. Минск, ул. Ольшевского, 59

Полоса: 1 – to Gudro

Скоростные ограничения: 40 км/ч



Фиксация ТС на второй контрольной точке

Номер ТС: 1555ТХУ7

Время: 16.11.2020 13:34:54

Место: г. Минск, ул. Ольшевского, 61

Полоса: 1 - to Gudro

Средняя скорость: 91 км/ч



Рисунок 4. – Макет доказательной базы в светлое время суток

Фиксация ТС на первой контрольной точке

Номер ТС: С614ТТ750

Время: 21.11.2020 01:09:53

Место: г. Минск, ул. Ольшевского, 59

Полоса: 1 – to Gudro

Скоростные ограничения: 40 км/ч



Фиксация ТС на второй контрольной точке

Номер ТС: С614ТТ750

Время: 21.11.2020 01:10:04

Место: г. Минск, ул. Ольшевского, 61

Полоса: 1 - to Gudro

Средняя скорость: 91 км/ч



Рисунок 5. – Макет доказательной базы в темное время суток

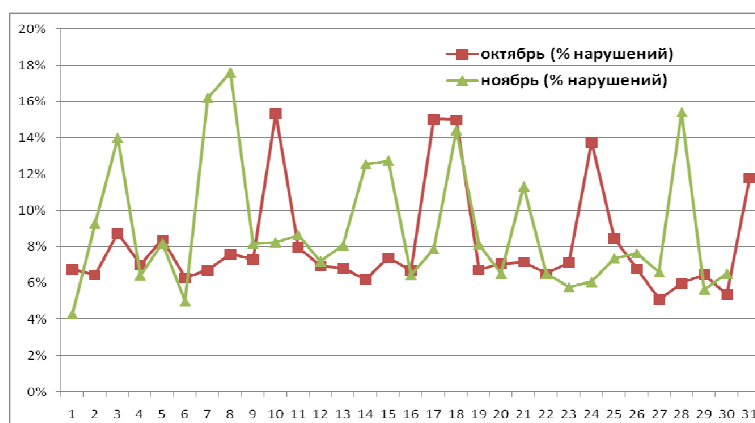


Рисунок 6. – График изменения количества нарушителей от общего числа проезжающих

Таблица 2. – Данные по превышениям установленной скорости за октябрь и ноябрь

таблица 2: Данные по превышениям установленной скорости за октябрь и ноябрь							
Дата	Количество		%	Дата	Количество		%
	нарушений	проездов			нарушений	проездов	
Октябрь 2020 г.				Ноябрь 2020 г.			
01.10.2020	544	8 059	6,75%	01.11.2020	182	4 256	4,28%
02.10.2020	429	6 670	6,43%	02.11.2020	415	4 470	9,28%
03.10.2020	465	5 324	8,73%	03.11.2020	567	4 052	13,99%
04.10.2020	349	4 982	7,01%	04.11.2020	445	6 945	6,41%
05.10.2020	427	5 079	8,41%	05.11.2020	658	8 030	8,19%
06.10.2020	454	7 228	6,28%	06.11.2020	445	8 946	4,97%
07.10.2020	504	7 503	6,72%	07.11.2020	907	5 602	16,19%
08.10.2020	581	7 650	7,59%	08.11.2020	825	4 685	17,61%
09.10.2020	594	8 153	7,29%	09.11.2020	622	7 632	8,15%
10.10.2020	772	5 040	15,32%	10.11.2020	667	8 096	8,24%
11.10.2020	432	5 442	7,94%	11.11.2020	694	8 035	8,64%
12.10.2020	509	7 343	6,93%	12.11.2020	545	7 577	7,19%
13.10.2020	508	7 445	6,82%	13.11.2020	600	7 445	8,06%
14.10.2020	424	6 847	6,19%	14.11.2020	859	6 847	12,55%
15.10.2020	522	7 057	7,40%	15.11.2020	893	7 007	12,74%
16.10.2020	494	7 395	6,68%	16.11.2020	477	7 418	6,43%
17.10.2020	748	4 984	15,01%	17.11.2020	392	4 984	7,87%
18.10.2020	710	4 737	14,99%	18.11.2020	543	3 767	14,41%
19.10.2020	513	7 627	6,73%	19.11.2020	619	7 627	8,12%
20.10.2020	570	8 081	7,05%	20.11.2020	525	8 081	6,50%
21.10.2020	573	8 030	7,14%	21.11.2020	908	8 030	11,31%
22.10.2020	531	8 169	6,50%	22.11.2020	531	8 169	6,50%
23.10.2020	593	8 322	7,13%	23.11.2020	475	8 253	5,76%
24.10.2020	760	5 522	13,76%	24.11.2020	498	8 229	6,05%
25.10.2020	447	5 286	8,46%	25.11.2020	336	4 573	7,35%
26.10.2020	512	7 564	6,77%	26.11.2020	571	7 472	7,64%
27.10.2020	408	8 051	5,07%	27.11.2020	568	8 613	6,59%
28.10.2020	479	8 011	5,98%	28.11.2020	929	6 031	15,40%
29.10.2020	223	3 452	6,46%	29.11.2020	459	8 154	5,63%
30.10.2020	383	7 125	5,38%	30.11.2020	541	8 313	6,51%
31.10.2020	974	8 275	11,77%	–	–	–	–
Всего:	16 432	210 453	7,81%	ВСЕГО:	17 696	207 339	8,53%

В таблице 3 представлены общие данные по количеству проездов и превышений установленной скорости за ноябрь и декабрь с учетом погрешностей метрологических характеристик КПА «RoadEye S01». Согласно описанию типа средств измерения, для Государственного реестра средств измерений пределы допускаемой абсолютной погрешности формирования индикатором времени КПА от Национальной шкалы времени в режиме синхронизации составляет ± 3 с.

Количество нарушителей с учетом метрологических требований резко уменьшается (в 32,7 раза – общее количество в ноябре, в 36,2 раза – в декабре). Это связано с тем, что погрешность ± 3 с (общая погрешность для фиксации нарушения на входе и выходе составляет 6 с) от Национальной шкалы времени слишком большая по отношению к зоне контроля средней скорости движения для пилотной проекта по ул. Ольшевского (300 м). Даже при незначительном превышении средней скорости движения на 11 км/ч (в зоне, где разрешенная максимальная скорость движения 40 км/ч) время проезда данного участка будет составлять 21,2 с, а с учетом погрешности превышение на 11 км/ч будет зафиксировано только при проезде за 15,2 с. Если довести погрешность до ± 1 с этот же факт в 15,2 с (проезд без учета погрешности за 17,2 с), он относился бы уже к значению 61 км/ч.

Очевидно, что при увеличении порога превышения разрешенной максимальной скорости движения в условиях погрешности фиксации времени нарушения ± 3 с, а также протяженности зоны контроля 300 м вероятность зафиксировать факт нарушения стремится к минимальному значению.

Проанализировав данные, приведенные в таблице 3, можно увидеть значительное снижение количества нарушений в декабре по отношению к ноябрю и октябрю (на 23,9% и 18,1% соответственно) при незначительном изменении транспортной нагрузки. Указанное изменение можно связать с тем, что 9 декабря 2020 г. был широко освещен в средствах массовой информации факт проведения пилотной зоны по опытному апробированию технологии и средства фиксации нарушений скоростных режимов методом вычисления средней скорости движения на участке ул. Ольшевского (minsknews.by, onliner.by, av.by, abw.by и др.), что свидетельствует о более эффективном обеспечении БДД при проведении контроля соблюдения правонарушений без широкого информирования и огласки, в т.ч. без обозначения предупреждающими дорожными знаками.

Таблица 3. – Данные по превышениям установленной скорости с учетом погрешности

Показатели		Ноябрь 2020 г.		Декабрь 2020 г.	
		за месяц	в среднем за день	за месяц	в среднем за день
Всего	Количество проездов	190 008	6 129	206 402	6 880
	Количество нарушений, без учета погрешностей	18 036	582	13 466	449
	% нарушений от проездов, без учета погрешностей	9,49%	9,49%	6,52%	6,52%
	Количество нарушений, с учетом погрешностей 6 с	551	18	367	12
	% нарушений от проездов, с учетом погрешностей 6 с	0,29%	0,29%	0,18%	0,18%
В будний день	Количество проездов	147 806	4 768	169 080	5 636
	Количество нарушений, без учета погрешностей	11 309	365	8 875	296
	% нарушений от проездов, без учета погрешностей	7,65%	7,65%	5,25%	5,25%
	Количество нарушений, с учетом погрешностей 6 с	286	9	211	7
	% нарушений от проездов, с учетом погрешностей 6 с	0,19%	0,19%	0,12%	0,12%
В будний день (7–20 ч)	Количество проездов	128 374	4 141	146 540	4 885
	Количество нарушений, без учета погрешностей	7 261	234	5 328	178
	% нарушений от проездов, без учета погрешностей	5,66%	5,66%	3,64%	3,64%
	Количество нарушений с учетом погрешностей 6 с	111	4	94	3
	% нарушений от проездов, с учетом погрешностей 6 с	0,09%	0,09%	0,06%	0,06%
Всего > 61 км/ч	Количество нарушений, без учета погрешностей	2 824	91	1 977	66
	% нарушений от проездов, без учета погрешностей	1,49%	1,49%	0,96%	0,96%
	Количество нарушений, с учетом погрешностей 6 с	3	0,10	8	0,27
	% нарушений от проездов, с учетом погрешностей 6 с	0,0016%	0,0016%	0,0039%	0,0039%

Стоит отметить, что в ходе развертывания пилотной зоны с применением КПА «RoadEye S01» необходимо небольшое количество монтажных работ, а с учетом организации питания вычислительного блока и видеомодуля от светофорного объекта или мобильных источников питания – комплекс может использоваться как временная мера на определенных участках с сезонным фактором увеличения аварийности, повышения рисков возникновения ДТП или транспортной нагрузки.

Выводы по результатам проведения пилотной зоны:

- для более качественного применения КПА «RoadEye S01» на небольших улицах городов (с минимальной протяженностью перегонов) необходимо производить улучшения в синхронизации фиксации времени въезда/выезда по отношению к Национальной шкале времени до значения погрешности ± 1 с;
- рекомендуется проводить контроль скоростных режимов через замер средней скорости проезда транспортным средством участка улицы (автомобильной дороги) на контрольных зонах протяженностью от около 1500 м, что наиболее эффективно для осуществления контроля на республиканских автомобильных дорогах и магистральных улицах городов;
- наличие кривых в плане и профиле участка улицы, где производится замер средней скорости проезда, а также мер успокоения движения, светофорного регулирования и нерегулируемых пересечений (примыканий второстепенных улиц, проездов прилегающей территории, парковок и т.д.) на качество выявления факта нарушения скоростных режимов не влияют, только на количество выявляемых правонарушений;
- комплекс «RoadEye S01» может использоваться как мобильный (например, в течении сезона года);
- осуществление контроля средней скорости проезда участка улицы для наиболее эффективного обеспечения БДД следует производить без обозначения предупреждающими дорожными знаками 1.36 «Контроль режима движения» или с применением нового типа информационно-указательных дорожных знаков 5.44 «Нача-

ло зоны контроля средней скорости» и 5.45 «Конец зоны контроля средней скорости» (рисунок 7) (дорожный знак начала зоны контроля может применяться совместно с дорожным знаком 3.24.1 «Ограничение максимальной скорости»);

– полученные данные по результатам функционирования пилотной зоны, сформированный макет доказательной базы и сертификат Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь № 13812 о регистрации средства измерений (допуск к применению в Республике Беларусь с 29 октября 2020 г.) свидетельствуют о готовности применения комплекса «RoadEye S01» на УДС в Республике Беларусь.



Рисунок 7. – Предлагаемые информационно-указательные знаки

Заключение. По результатам проведения пилотных зон автоматического контроля правонарушений и детектирования дорожного движения в г. Минске:

- выработаны практические рекомендации и предложения для применения КПА «RoadEye S01»;
- проведен качественный анализ применения технологии контроля скоростных режимов через фиксацию факта превышения средней скорости проезда участка улицы;
- разработан макет доказательной базы для фиксации факта превышения средней скорости проезда участка улицы и внесены предложения по оборудованию места осуществления такого контроля;
- оборудована пилотная зона и проведено практическое исследование соответствия техническим условиям и качественным характеристикам радарного детектора;
- выполнено практическое исследование эффективности применения радарной технологии для адаптивного светофорного регулирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Применение методов видеоконтроля дорожного движения: теоретические и практические основы / Д.В. Капский [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2021. – № 11(44). – С. 37–44.
2. Воробьев, А.И. Методика определения мест установки системы фото- и видеофиксации и дополнительных элементов инфраструктуры / А.И. Воробьев, М.В. Гаврилюк // Вестн. МАДИ. – 2013. – № 2(33). – С. 82–87.
3. Капский, Д.В. Развитие автоматизированной системы управления дорожным движением Минска как части интеллектуальной транспортной системы города [Электронный ресурс] / Д.В. Капский, Д.В. Навой // Наука и техника. – 2017. – Т. 16. – Режим доступа: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/27593/Razvitie_avtomatizirovannoj_sistemy_upravleniya_dorozhnym_dvizheniem_Minska.pdf. – Дата доступа: 25.12.2020.

REFERENCES

1. Kapskij D.V., Levanovich D.V., Vigerina T.V., & Golovnich A.K. (2021). *Primenenie metodov videokontrolya dorozhnogo dvizheniya: teoreticheskie i prakticheskie osnovy* [Application of video traffic control methods: theoretical and practical foundations]. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta* [Herald of Polotsk State University], 11(44). 37–44. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Vorob'ev, A.I., & Gavriljuk, M.V. (2013). *Metodika opredeleniya mest ustanovki sistemy foto- i videofiksacii i dopolnitel'nyh elementov infrastruktury* [Methodology for determining the installation sites of the photo- and video recording system and additional infrastructure elements]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*

[*Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University*], 2(33), 82–87. (In Russ., abstr. in Engl.).

3. Kapskiy, D.V. & Navoy, D.V. (2017). Razvitiye avtomatizirovannoy sistemy upravleniya dorozhnym dvizheniyem Minska kak chasti intellektu-al'noy transportnoy sistemy goroda [Development of an automated traffic control system in Minsk as part of the city's intelligent transport system]. *Nauka i tekhnika* [Science and technology], Vol. 16. (In Russ., abstr. in Engl.). https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/27593/Razvitie_avtomatizirovannoj_sistemy_upravleniya_dorozhnym_dvizheniem_Minska.pdf

Поступила 09.11.2021

JUSTIFICATION OF THE CHOICE OF MEANS AND PROCESSES OF SPEED CONTROL VEHICLE MOVEMENT

D. KAPSKY, D. LEVANOVIC, T. VIGERINA, A. GOLOVNICH

The necessity and possibility of using the «RoadEye S01» software and hardware complex produced by the Safe Roads of Belarus CJSC in the Republic of Belarus (TU BY 191694101.001-2019) on the streets of cities with a stretch of about 1500 m with a time measurement error of ± 1 s has been substantiated. It is recommended to control speed limits by measuring the average speed of a vehicle's passage of a section of a street (motor road) in control zones.

Control of the average speed of passage of a section of the street for the most effective provision of road safety should be carried out without warning road signs 1.36 «Traffic control» or with the use of a new type of information and direction signs 5.44 «Beginning of the average speed control zone» and 5.45 «End of the average speed control zone». The road sign of the beginning of the control zone can be used in conjunction with the road sign 3.24.1 «Maximum speed limit». The information obtained on the results of the pilot zone functioning, the model of the evidence base and the certificate of the State Committee for Standardization of the Republic of Belarus No. 13812 on the registration of the measuring instrument (admission to use in the Republic of Belarus from October 29, 2020) testifies to the readiness of using the «RoadEye S01» complex at the UDS in the Republic of Belarus.

Keywords: vehicle, speed of movement, restrictions, means of control, control process.

УДК 656

АНАЛИЗ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

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

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

д-р техн. наук, проф. А.К. ГОЛОВНИЧ
(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)

Рассмотрено использование датчиков различных видов в системе управления дорожным движением. Реализацией пилотной зоны и применением радиолокационного детектора «IMTR-A1» установлено, что с его помощью обнаруживали все движущиеся и остановленные транспортные средства. На его работу не влияет освещенность, засветки, вибрация, грязь и насекомые. В ходе тестовой эксплуатации в период с апреля по декабрь 2020 г. влияние температуры воздуха, дождя, тумана на ДТ не выявлено. С момента монтажа в техническом обслуживании не нуждались. Зафиксирован подсчет пешеходов, переходящих проезжую часть по регулируемому пешеходному переходу. Экономическая эффективность применения датчиков обусловлена многофункциональностью, простотой установки и долговечностью.

Ключевые слова: транспортное средство, скорость движения, ограничения, средства контроля, процесс контроля, детектирование.

Введение. Управление дорожным движением требует информации о его состоянии, выраженном параметрами, измеренными с помощью датчиков¹. Совокупность значений параметров в виде системы детектирования транспортных потоков необходима для гибкого регулирования, расчета или автоматического выбора программы управления дорожным движением. С помощью системы детектирования транспортных потоков выполняют:

- адаптивное управление светофорами;
- классификацию, определение количества и скорости транспортных средств;
- учет правонарушений;
- мониторинг парковочного пространства;
- массагабаритный контроль.

Систему детектирования дорожного движения составляют: датчики, контроллеры, модули видеорегистрации, каналы передачи данных, программно-аппаратное обеспечение сбора, архивирования и просмотра данных. Задачи детектирования транспортного потока следующие:

- имитационное моделирование и инженерный анализ состояния транспортной сети;
- управление дорожным движением с применением различных подсистем в АСУДД;
- мониторинг эффективности работы различных подсистем АСУДД².

Эффективность использования систем детектирования доказана множеством успешных проектов, реализованных в экономически развитых странах мира [1]. Использование датчиков как средств управления транспортным потоком позволяет собрать данные:

- для предоставления приоритетного права проезда;
- светофорного регулирования;
- информирования о состоянии транспортного потока и маршрутного ориентирования;
- управления парковочным пространством;
- контроля въезда на автомагистраль;

Использование датчиков в системах предоставления приоритетного права проезда на перекрестках активно используется в США и европейских странах [2; 3]. В результате четырехлетней эксплуатации системы, например, в Берлине, 90% транспортных средств проезжали через перекресток без остановки. В городе Росток (Германия) увеличение скорости сообщения трамваев на маршруте, идущем от главного вокзала через центр к северо-восточной окраине города, составило 40%.

¹ Детекторы транспорта [Электронный ресурс]. URL: https://studbooks.net/81362/tehnika/detektory_transporta

² Безопасность дорожного движения [Электронный ресурс]. URL: https://www.adi-madi.ru/madi/article/viewFile/90/pdf_41

Для крупных мегаполисов актуальным является управление въездом на автомагистраль и задачи изменения маршрутов транспортного потока, чтобы исключить заторы или цепные столкновения. Многие страны Европы, а также США и Япония используют систему «Ramp Metering», которая измеряет характеристики движения транспортных потоков с достаточным опережением перед въездной рампой. Расстояние до точки измерения зависит от допустимой скорости, но оно должно быть не менее 1000–1500 м. При этом измеряют на каждой полосе интенсивность, скорость и состав транспортного потока. Транспортная модель постоянно оценивает степень нагрузки и прогнозирует состояние транспортного потока на автомагистрали перед соответствующим въездом. Система управления с помощью светофора «дозировать» количество транспортных средств, подъезжающих по примыкающей дороге. Длительность зеленого сигнала определяется текущим и прогнозируемым состоянием транспортного потока на автомагистрали. Внедрение данной системы позволяет значительно сократить задержки при въезде на автомагистраль. Среднее время проезда после внедрения системы сокращается практически на 40% [4].

Важная задача организации и управления транспортными потоками – направление части транспортного потока по смежным, менее загруженным, направлениям. Такая система, например, функционирует в южной части Пражской кольцевой дороги длиной 30 км. Использование данной системы обеспечивает повышение пропускной способности на 15% и уменьшение аварийности на 35%.

Основная часть. Детекторы по функциональному назначению делятся:

- на проходные детекторы, которые выдают нормированные по продолжительности сигналы при появлении транспортного средства в контролируемой детектором зоне;
- детекторы присутствия выдают сигнал в течение всего времени пребывания транспортного средства в зоне, контролируемой детектором;
- детекторы стоп-линии используют для определения наличия автомобиля в зоне стоп-линии;
- тактические детекторы служат для мониторинга и долгосрочного планирования режимов работы адаптивных систем путем сбора интервальных данных о транспортных потоках;
- стратегические детекторы предназначены для корректировки работы дорожных контроллеров путем получения сведений о наличии транспортного средства, расстояния между автомобилями и скорости каждой единицы транспорта.

Детекторы контактного типа (первое поколение) – электромеханические, пневматические и пьезоэлектрические. Сигнал о появлении автомобиля возникает от непосредственного соприкосновения его колес с протяжным чувствительным элементом, который располагается на дорожном полотне перпендикулярно к движению. Детекторы этой группы дешевые и простые по конструкции, однако, требуют нарушения дорожного полотна, поэтому при новом строительстве практически не используются.

Чувствительные элементы электромагнитных детекторов (второе поколение) – катушка с магнитным сердечником или индукционная петля – закладываются под дорожное покрытие на некоторую глубину. Автомобиль, имеющий металлическую массу, регистрируется благодаря искривлению магнитного поля или изменению индуктивности рамки в момент его прохождения над чувствительным элементом детектора.

К детекторам излучения (третье поколение) относятся фотоэлектрические, ультразвуковые, инфракрасные, радарные и видеодетекторы. Наибольшее распространение получили детекторы последних двух групп.

Применение в городе Минске средств детектирования транспортных потоков. Большая часть приведенных средств детектирования транспортных потоков в том или ином виде используют в Республике Беларусь. В городе Минске в основном (около 70%) применяют датчики второго поколения – электромагнитные детекторы «VSN240-F-2» совместно со вспомогательным периферийным оборудованием (рисунок 1).

Например, на регулируемых пересечениях пр. Машерова на участке от пр. Независимости до ул. Тимирязева для управления дорожным движением совместно с беспроводными магнитно-резистивными датчиками «VSN240-F-2» (производства «Sensys Networks») применяют видеодетекторы «SmartLoop TS City Plus» и bluetooth-детекторы «Traffic Bluetooth Sensor».

В Минске до последнего времени радарные детекторы применялись только в рамках функционирования тестовых (пилотных) зон. Однако в конце 2020 г. на пересечении пр. Дзержинского, ул. Немига и ул. К. Цеткин (пл. Ф. Богушевича) в рамках объекта нового строительства (реконструкция пересечения при прокладке ветки метрополитена) для реализации режимов местного гибкого регулирования на круговом регулируемом пересечении были установлены радиолокационные детекторы «Smartmicro» (производства «Sms smart microwave sensors GmbH») совместно с дорожным контроллером «СИДК». В настоящий момент на пл. Ф. Богушевича строительно-монтажные работы завершены, проводятся пуско-наладочные работы ДТ, после чего впервые в республике радарные ДТ будут введены в промышленную эксплуатацию.

Несмотря на достоинства радарных технологий, видеодетекторы также имеют ряд существенных преимуществ. Их основным преимуществом является то, что изображение адекватно человеческому восприятию окружающего мира. Пример работы видеодетекторов в ночное и дневное время суток на пр. Машерова представлен на рисунке 2 [5].

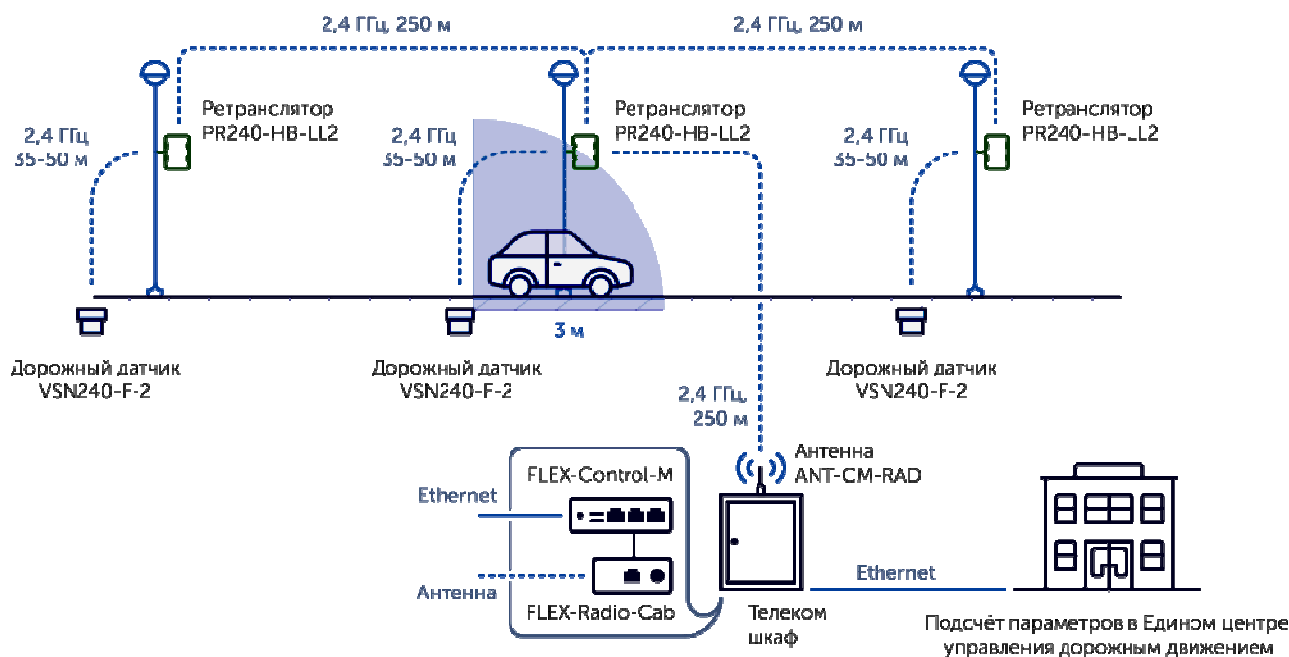


Рисунок 1. – Схема оборудования перекрестка беспроводными ДТ



Рисунок 2. – Работа видеодетекторов в ночное и дневное время суток

Дополнительным преимуществом видеодетекторов является высокая информативность видео как источника информации, что предоставляет уникальные возможности по дальнейшему развитию этого направления. Это может быть детектирование случаев проезда на «красный» сигнал, выездов на встречную полосу движения, интеллектуального наблюдения парковок и др.

Развитие полупроводниковых технологий приводит к постоянному снижению стоимости, повышению надежности и других потребительских качеств видеодетекторов, что делает их более доступными и создает предпосылки для массового распространения. Если 10 лет назад для обработки видеоизображения в реальном масштабе времени требовался громоздкий вычислитель стоимостью в десятки тысяч долларов, то сегодня это компактный прибор, а его цена приближается к 1000 долл. США.

Каждая современная технология измерения характеристик транспортного потока – радарная и видео – имеет свои достоинства и недостатки, что обеспечивает их паритет. Обе технологии будут развиваться параллельно, дополняя возможности и компенсируя недостатки друг друга. В перспективных системах мониторинга дорожного движения будет использоваться объединение информации от обоих каналов.

В рамках исследования рассмотрим на примере пилотной зоны наиболее непредставленную в Республике Беларусь радарную технологию детектирования дорожного движения.

Опытная эксплуатация средств детектирования транспортных потоков. Цель – опытное апробирование технологии детектирования третьего поколения (радарной) по результатам опытной эксплуатации на тестовой площадке.

Задачи, реализуемые в ходе проведения пилотного проекта:

- оборудование пилотной зоны и исследование дорожного движения на ней;
- практическое исследование эффективности применения радарной технологии детектирования дорожного движения.

Реализация пилотной зоны по опытной эксплуатации технических решений для фиксации нарушений средней скорости проезда транспортных средств на участке УДС проводилась в мае–ноябре 2020 г. в рамках договора о сотрудничестве (партнерстве) между ГУВД Мингорисполкома и ООО «ЛЭС-Интернэшнл (МСК) информационные технологии» (резидент Китайско-Белорусского индустриального парка «Великий камень»).

Пилотная зона организована на трехстороннем регулируемом пересечении пр. Газеты Правда и ул. Алибегова. Главное направление исследуемого пресечения – ул. Алибегова – относится к категории магистральной улицы общегородского значения (А). Основной транспортной функцией ул. Алибегова является распределение транспортных потоков со стороны пр. Дзержинского в сторону ул. Притыцкого, а также соединяющая функция – Московский и Фрунзенские районы г. Минска (жилые микрорайоны «Каменная горка», «Масюковщина» и «Дамбровка» с микрорайонами «Михалово» и «Юго-Запад»).

В соответствии с п. 5.1.1 ТКП 45-3.03-227-2010 расчетная скорость движения транспортных средств для категории А в свободных условиях составляет 80 км/ч, в стесненных условиях – 60 км/ч. Максимальная разрешенная скорость движения транспортных средств согласно ПДД – 60 км/ч.

В зоне исследуемого перекрестка по главному направлению – ул. Алибегова – организовано по четырем (3 для транзитного и 1 для прямого и правоповоротного потоков) полосам для движения и по одной конструктивно выделенной дополнительной полосе для движения в каждом направлении (левоповоротной со стороны ул. Железнодорожной и разворотной со стороны ул. Я. Брыля). Вход с пр. Газеты Правда имеет по 3 полосы для движения в каждом направлении – 1-я направо, 2-я направо и налево, 3-я налево (рисунок 3). На рисунке представлена схема расстановки применяемых в рамках пилотного проекта радиолокационных детекторов «IMTR-A1».

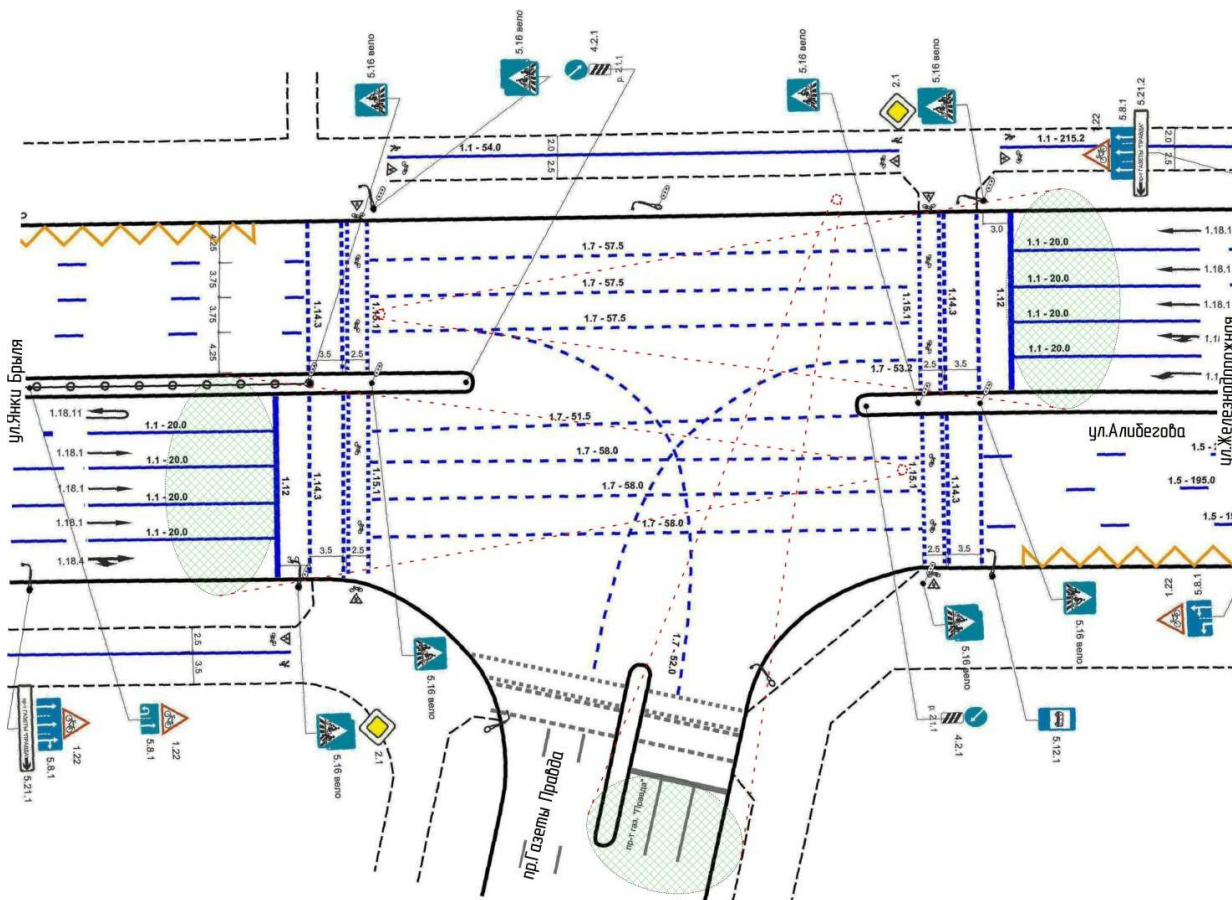


Рисунок 3. – Схема организации дорожного движения в пилотной зоне с использованием детекторов «IMTR-A1»

Ширина левоповоротной и разворотной полос для движения по ул. Алибегова в зоне указанного пересечения составляет 3,5 м (по 1 полосе в каждом направлении), для полос движения транзитного потока (прямого) – 3,75 м (по 3 полосы в каждом направлении), а полосы движения для транзитного направления, по которым

в т.ч. осуществляется движение городского маршрутно-пассажирского транспорта, составляют по 4,25 м (по 1 полосе в каждом направлении). Ширина полос с пр. Газеты Правда составляет по 3,5 м (3 полосы).

На пересечении пр. Газеты Правда и ул. Алибегова организовано светофорное регулирование. Длительность цикла светофорного регулирования в режиме «локального управления» составляет 84 с, в режиме «координированного управления» – 100 с, который работает большую часть времени суток – с 7 до 19 часов (рисунок 4). Цикл регулирования изменяется с учетом транспортной нагрузки.

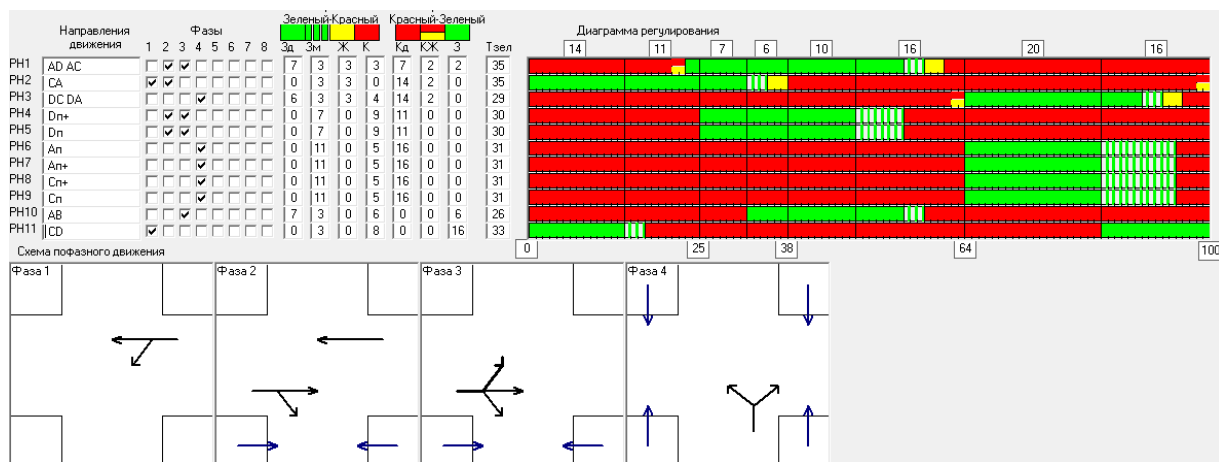


Рисунок 4. – Базовый цикл светофорного регулирования

Схема пофазного движения – 4-фазная, в которой организовано бесконфликтное левоповоротное движение с ул. Алибегова со стороны ул. Железнодорожная на пр. Газеты Правда, а также разворотного потока со стороны ул. Я. Брыля. Движение пешеходов на светофорном объекте через ул. Алибегова и пр. Газеты Правда осуществлен в регулируемом режиме.

Применение детекторов и анализ результатов реализации пилотной зоны. В рамках пилотной зоны на пересечении пр. Газеты Правда и ул. Алибегова на выносах к светофорной спецколонке (2 ед. с высотой установки около 5 м) и на колонке дорожного знака (1 ед.) были установлены детекторы радарного типа «IMTR-A1» (производства «Nanjing LES Information Technology Co. Ltd», КНР) (рисунок 5).



Рисунок 5. – Внешний вид детектора «IMTR-A1»

В ДТ «IMTR-A1» используется многомерная радарная технология сканирования и усовершенствованный алгоритм отслеживания DSP. Детектор может контролировать от четырех до восьми полос, длина которых превышает 200 м по вертикали (зона обнаружения). Максимальное количество целей мгновенного определения скорости или местоположения, а также моделирования транспортного потока в режиме реального времени – 128. С использованием «IMTR-A1» возможна установка солнечного электропитания и организация беспроводной передачи данных. Режим работы ДТ по характеристикам производителя – 24 часа 7 дней в неделю, при любых погодных условиях. При необходимости ДТ выполняется самокалибровка и самодиагностика неисправностей.

ДТ фиксирует следующую информацию: обнаружение транспортного средства, мгновенная скорость транспортного средства, местоположение и тип транспортного средства, что позволяет при данном наборе свойств реализовывать с его использованием адаптивную технологию светофорного регулирования (доступна максимально 4 раздела одновременной фиксации данных по транспортному потоку). Техническая характеристика детектора «IMTR-A1» представлена в таблице 1.

Таблица 1. – Техническая характеристика ДТ «IMTR-A1»

Характеристика	Значение
Точность обнаружения	Погрешность расстояния: $< \pm 0,25$ м
	Погрешность скорости: $< \pm 1,008$ км/ч
Питание	Мощность: 9 Вт
	Напряжение: 12–24 В, VDC
Выходной интерфейс	RS485
	RJ45
Условия работы	Температура: $-40 \sim +85$ °C
	Влажность: ≤ 100 %

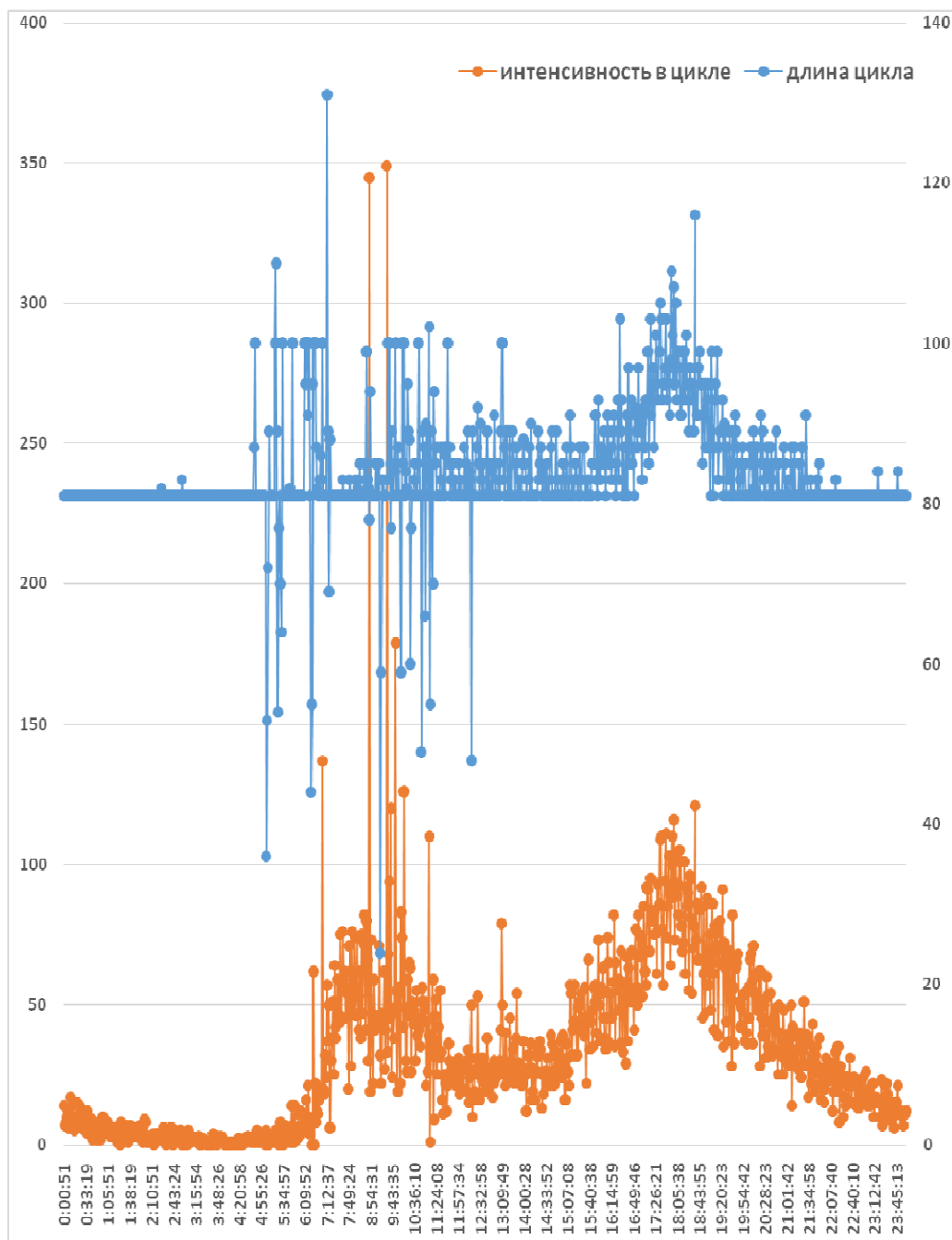


Рисунок 6. – Распределения длины цикла и интенсивности движения в цикле по времени суток

Показатели эффективности работы детекторов в рамках пилотной зоны фиксировались по данным транспортной нагрузки (средней и максимальной интенсивности движения) в периоды времени 7–10, 10–12, 12–14, 14–16, 16–19, 19–21 и 21–24 часов. Для анализа потерь в дорожном движении рассмотрены наборы циклов регулирования светофорного объекта, зафиксированные в период времени с 0 часов 15.07.2020 г. по 0 часов 18.07.2020 г. с учетом адаптации по изменениям транспортной нагрузки (см. рисунок 6).

Анализ распределения циклов регулирования и зависимости длины цикла от интенсивности движения в цикле позволил выделить 18 основных графиков светофорного регулирования (59, 81, 82, 83, 85, 86, 87, 89, 91, 92, 93, 95, 97, 99, 100 с) для последующего расчета потерь и оценки эффективности использования адаптивной технологии (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты расчета потерь для периодов времени

Время суток	Цикл, с	Потери, долл. США в год (при средней ИД)	Доля цикла регулирования в периоде времени	Потери, долл. США в год (при максимальной ИД)
7–10	59	17 000	2,3	–
	81	35 000	60,5	–
	82	35 000	2,3	–
	83	36 000	10,5	–
	85	35 000	7	288 000
	89	36 000	2,3	–
10–12	100	39 000	4,7	–
	86	19 000	3,1	–
	89	18 000	4,6	35 000
	100	21 000	6,2	–
	83	20 000	7,7	–
	87	19 000	9,2	–
12–14	85	20 000	10,8	–
	81	19 000	38,5	–
	84	24 000	2,9	–
	100	27 000	2,9	–
	83	25 000	7,1	49 000
	87	25 000	8,6	–
14–16	89	23 000	11,4	–
	85	24 000	14,3	–
	81	25 000	45,7	–
	89	23 000	3,5	–
	91	23 000	3,5	–
	87	25 000	11,6	–
19–20	85	24 000	12,8	49 000
	83	25 000	20,9	–
	81	24 000	44,2	–
	91	27 000	2,4	–
	99	26 000	2,4	–
	93	27 000	3,6	–
21–24	83	30 000	7,1	–
	89	28 000	11,9	–
	85	29 000	14,3	–
	87	30 000	15,5	–
	81	29 000	38,1	54 000
	84	16 000	1,5	–
	85	16 000	2,3	45 000
	87	17 000	2,3	–
	83	17 000	6,1	–
	81	16 000	87,1	–

Итоговые показатели экономических потерь в дорожном движении на пилотной зоне до и после внедрения новой технологии управления дорожным движением с применением ДТ «IMTR-A1» приведены в таблице 3.

Эффективность технологий, реализованных в рамках пилотной зоны, для показателей средней интенсивности движения составляет в среднем 8,0%, для показателей максимальной интенсивности движения – 8,4 %.

В результате ручного подсчета проезжающих автомобилей за определенный отрезок времени с видеокамеры и сверки с поступающими от детектора данных был установлен высокий показатель надежности по обнаружению и подсчету транспортных средств. Подсчет погрешности производится отдельно по каждому направ-

лению: сначала 5 направлений по видеокамере, потом 5 направлений по окну детекторов транспорта. Анализ данных за просчитываемый период показал, что ложные срабатывания зон в совокупности с ошибками ручного подсчета вносят до 5,5% погрешности. Средняя достоверность поступающих данных тестируемых детекторов за отчетный период составила не менее 93,7%.

Таблица 3. – Итоговые показатели потерь при применении ДТ

Время суток	Экономические потери до изменений в год, долл. США	Экономические потери после изменений, долл. США в год	Эффективность изменений, %	Экономические потери до изменений в год, долл. США	Экономические потери после изменений в год, долл. США	Эффективность изменений, %
	для средней ИД			для максимальной ИД		
0–5	300 000	300 000	0	–	–	–
5–7	600 000	600 000	0	31 000	31 000	0,0
7–10	3 126 200	3 494 400	11	315 000	288 000	8,6
10–12	1 682 100	1 548 200	8	39 000	35 000	10,3
12–14	2 508 300	2 288 300	8,7	53 000	49 000	7,5
14–16	2 605 500	2 341 500	10	55 000	49 000	10,9
16–19	4 180 000	3 598 800	14	96 000	85 000	11,5
19–21	3 049 600	2 755 200	9,7	59 000	54 000	8,5
21–24	1 787 400	1 597 200	10,6	50 000	45 000	10,0
	Итого средний %					8,4

Закключение. Результаты реализации пилотной зоны и применения радиолокационного детектора «IMTR-A1»:

- в ходе функционирования ДТ хорошо обнаруживались все движущиеся и остановленные транспортные средства. ДТ не имеют оптических элементов, поэтому на их работу не влияет освещенность, засветки, вибрация, грязь и насекомые. В ходе тестовой эксплуатации в период с апреля по декабрь 2020 г. влияние температуры воздуха, дождя, тумана на ДТ не выявлено. С момента монтажа в техническом обслуживании не нуждались;

- крупногабаритные транспортные средства иногда разделяются на два коротких объекта. При использовании счетных каналов это может вызывать ложные срабатывания. Перестроение вблизи места расположения виртуальных зон иногда вызывает срабатывание двух смежных зон (указанные факты включены в общую погрешность);

- зафиксирован подсчет ДТ пешеходов, переходящих проезжую часть по регулируемому пешеходному переходу;

- ДТ позволяет непрерывно отслеживать траекторию движения транспортных средств, а специальные алгоритмы не позволяют терять объект из вида даже при временном перекрытии низких транспортных средств более высокими;

- более высокая эффективность работы детектора «IMTR-A1» при его установке максимально близко к середине зоны детекции;

- детектор «IMTR-A1» подходит для применения в различных подсистемах ИТС.

Экономическая эффективность применения датчиков обусловлена:

- при проектировании – многофункциональностью, поскольку большинство задач решаются минимальным количеством оборудования;

- при монтаже – простотой установки, т.к. нет необходимости устанавливать специальные опоры или делать траншеи (или углубления) в дорожном покрытии;

- при обслуживании – долговечностью детекторов, они служат долгие годы;

- при ремонте – минимальными простоями и затратами в случае отказа с заменой и настройкой элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прижбыл, П. Телематика на транспорте / П. Прижбыл, М. Свитек ; пер. с чеш. О. Бузека и В. Бузковой ; под ред. В.В. Сильянова. – М. : МАДИ, 2003. – 540 с.
2. Воробьев, А.И. Методика определения мест установки системы фото- и видеофиксации и дополнительных элементов инфраструктуры / А.И. Воробьев, М.В. Гаврилюк // Вестн. МАДИ. – 2013. – № 2(33). – С. 82–87.
3. Жанказиев, С.В. Динамическое предоставление приоритета проезда для средств общественного транспорта / С.В. Жанказиев, П. Прижбыл, А.В. Шадрин // Автотранспорт. предприятие. – 2011. – № 7. – С. 24–27.
4. Highway Capacity Manual. TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2000.
5. Капский, Д.В. Развитие автоматизированной системы управления дорожным движением Минска как части интеллектуальной транспортной системы города [Электронный ресурс] / Д.В. Капский, Д.В. Навой // Наука и техника. – 2017. – Т. 16. – Режим доступа: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/27593/Razvitie_avtomatizirovannoj_sistemy_upravleniya_dorozhnyim_dvizheniem_Minska.pdf. – Дата доступа: 25.12.2020.

REFERENCES

1. Prizhbyl, P., & Svitek, M. (2003). *Telematika na transporte* [Telematics in transport]. Moscow: MADI. (In Russ.).
2. Vorob'ev, A.I., & Gavriluk, M.V. (2013). Metodika opredeleniya mest ustanovki sistemy foto- i videofiksacii i dopolnitel'nyh elementov infrastruktury [Methodology for determining the installation sites of the photo and video recording system and additional infrastructure elements]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University], 2(33), 82–87. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Zhankaziev, S.V., Przhibyl, P., & Shadrin, A.V. (2011). Dinamicheskoe predostavlenie prioriteta proezda dlya sredstv obshchestvennogo transporta [Dynamic provision of travel priority for public transport]. *Avtotransportnoe predpriyatie* [Motor Transport company], 7, 24–27. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. *Highway Capacity Manual*. (2000). Washington, D.C. (In Engl.).
5. Kapskiy, D.V. & Navoy, D.V. (2017). Razvitiye avtomatizirovannoy sistemy upravleniya dorozhnym dvizheniyem Minska kak chasti intellektu-al'noy transportnoy sistemy goroda [Development of an automated traffic control system in Minsk as part of the city's intelligent transport system]. *Nauka i tekhnika* [Science and technology], Vol. 16. (In Russ., abstr.in Engl.). https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/27593/Razvitie_avtomatizirovannoj_sistemy_upravleniya_dorozhnym_dvizheniem_Minska.pdf

Поступила 11.01.2022

ANALYSIS OF DETECTING TRAFFIC PARAMETERS

D. KAPSKY, D. LEVANOVICH, V. IVANOV, A. GOLOVNICH

The use of sensors of various types in the traffic control system is considered. The implementation of the pilot zone and the use of the IMTR-A1 radar detector found that it detected all moving and stopped vehicles. Its work is not affected by light, glare, vibration, dirt and insects. During test operation in the period from April to December 2020, the influence of air temperature, rain, fog on diesel fuel was not revealed. They have not required any maintenance since installation. The count of pedestrians crossing the carriageway at the controlled pedestrian crossing has been recorded. The cost-effectiveness of the use of sensors is due to the versatility, ease of installation and durability.

Keywords: vehicle, speed of movement, restrictions, means of control, process of control, detection.

УДК 656.13

РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОГО ТРАВМАТИЗМА С УЧАСТИЕМ НЕЗАЩИЩЕННЫХ КАТЕГОРИЙ УЧАСТНИКОВ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

канд. техн. наук, доц. С.А. АЗЕМША, И.Н. КРАВЧЕНЯ, А.В. ВОРОНА
(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)

Незащищенными категориями участников дорожного движения являются пешеходы, велосипедисты и возчики. С их участием в Республике Беларусь происходит значительно количество дорожно-транспортных происшествий. Учитывая специфику таких категорий участников дорожного движения, тяжесть последствий этих аварий, как правило, высока. Поэтому разработка мероприятий по повышению безопасности движения незащищенных категорий участников дорожного движения позволит значительным образом повлиять на ситуацию с аварийностью.

На территории Гомельской области действует комплекс мер по повышению безопасности дорожного движения «Добрая дорога». Одним из направлений работы, предусмотренных данным документом, является разработка мер по повышению безопасности дорожного движения незащищенных категорий участников дорожного движения. В данной статье приведены результаты статистического анализа аварийности с участием таких категорий участников дорожного движения по Гомельской области и на его основе предложены пути снижения аварийности с их участием.

Ключевые слова: безопасность дорожного движения, пешеход, велосипедист, дорожно-транспортное происшествие, добыча данных, таблицы сопряженности.

Введение. Проблема аварийности на автомобильных дорогах уже более десятилетия вышла на наднациональный уровень, и в рамках деятельности Организации Объединенных Наций задачу снижения погибших и раненых в дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) решает Всемирная организация здравоохранения¹. В рамках своей деятельности ВОЗ проводит исследования аварийности во всем мире и разрабатывает рекомендации по снижению количества погибших и раненых. Ряд проведенных исследований показывают, что почти половина из 1,27 млн человек, ежегодно погибающих в дорожно-транспортных происшествиях, – это пешеходы, мотоциклисты и велосипедисты². В странах СНГ, в т.ч. и в Беларуси, ситуация аналогичная (рисунок 1).

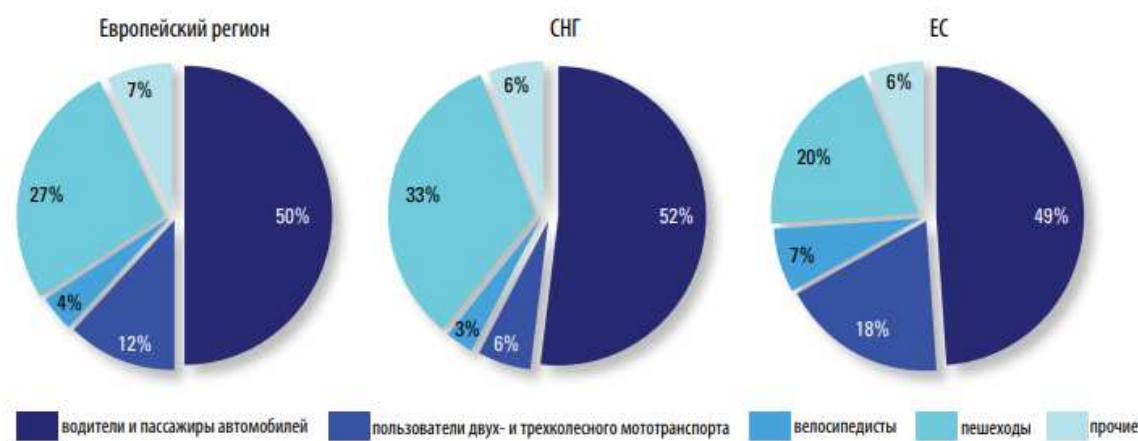


Рисунок 1. – Доля погибших в результате ДТП по типу транспортного средств в Европейском регионе ВОЗ, странах СНГ и ЕС³

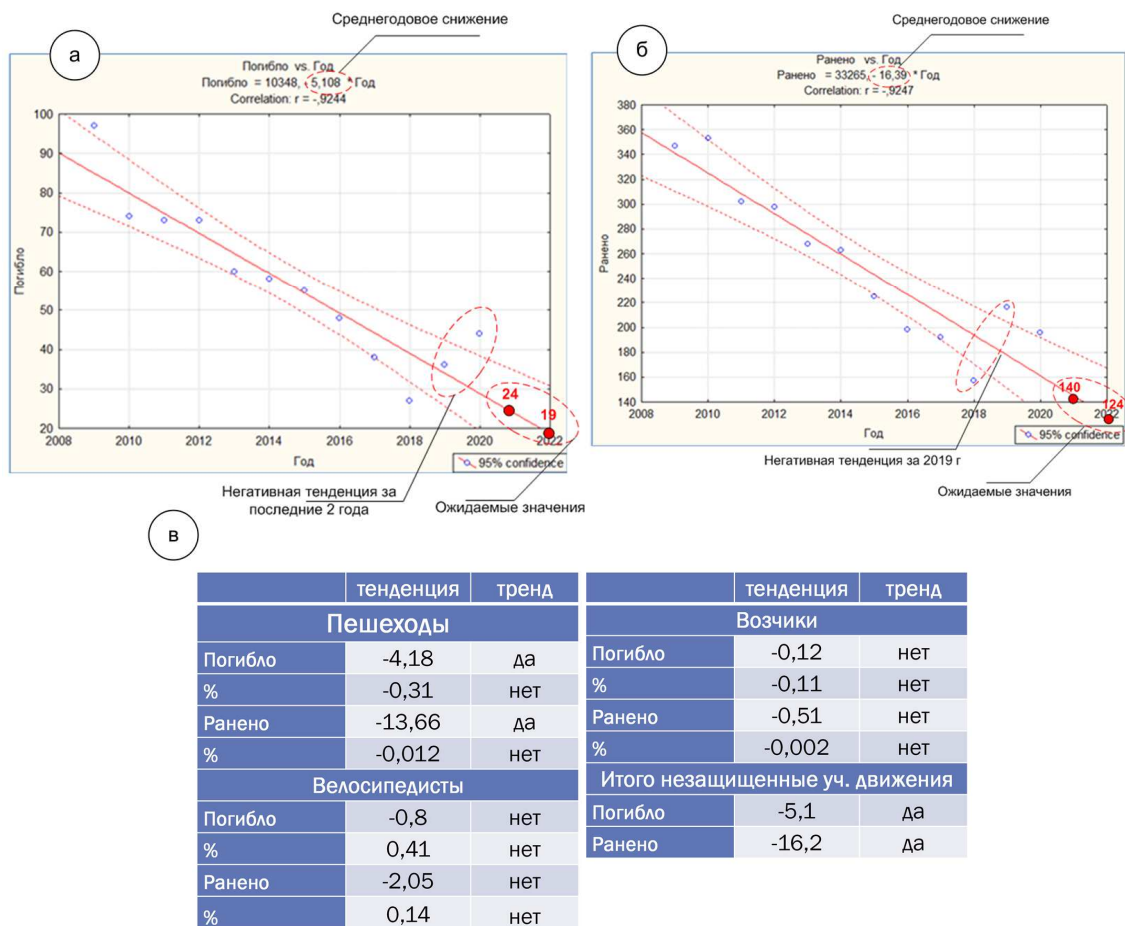
Несмотря на достигнутый прогресс в защите людей в автомобилях, потребности этих уязвимых групп участников дорожного движения не удовлетворяются. В связи с этим разработка мероприятий по повышению безопасности движения незащищенных категорий участников дорожного движения является актуальной.

¹ World health organization [Electronic resource]. URL: <https://www.who.int/>

² Pedestrians, cyclists among main road traffic crash victims [Electronic resource] / World health organization. URL: <https://www.who.int/news/item/11-12-2010-pedestrians-cyclists-among-main-road-traffic-crash-victims>

³ Европейские факты и доклад о состоянии безопасности дорожного движения в мире [Электронный ресурс]. URL: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/192077/Road-Safety-Facts-Rus.pdf

Основная часть. Для решения такой задачи на территории Гомельской области действует комплекс мер по повышению безопасности дорожного движения «Добрая дорога». Основным инструментом решения задачи является статистический анализ данных об аварийности с участием незащищенных категорий участников дорожного движения. Основные показатели, характеризующие динамику изменения аварийности в Гомельской области с участием указанной категории участников дорожного движения за период с 2009 по 2020 гг., приведены на рисунке 2.



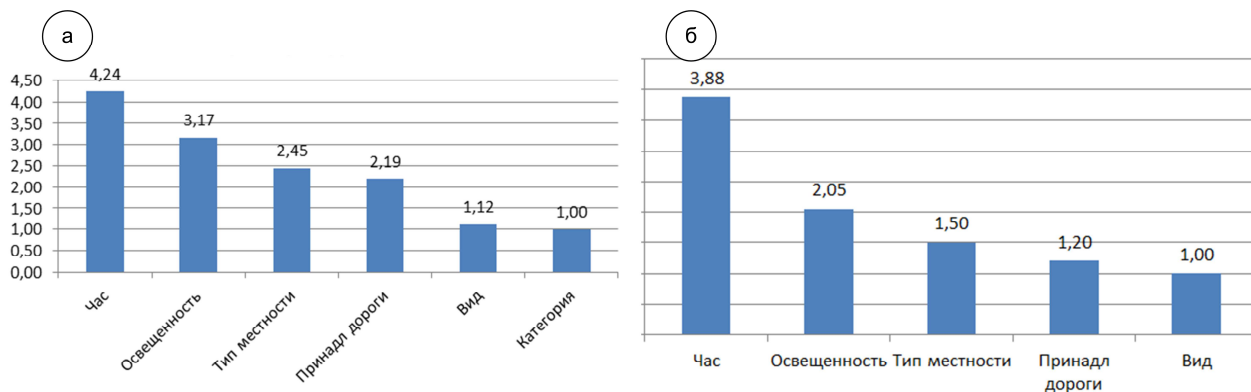
а – количество погибших; **б** – количество раненых; **в** – тенденция и тренд числа погибших и раненых

Рисунок 2 – Динамика изменения количества погибших и раненых незащищенных участников дорожного движения в Гомельской области за период с 2009 по 2020 гг.

Согласно рисунку 2, в 2019 и 2020 гг. наблюдался рост числа погибших. Рост числа раненых наблюдался только в 2019 г. (рисунок 2, б). Также следует, что динамика изменения числа погибших и раненых хорошо описывается линейной регрессией. При этом среднегодовое число погибших составляет 5,1 чел., раненых – 16,39. Из рисунка 2, в следует, что несмотря на увеличение числа погибших и раненых в последние годы, в общем за рассматриваемый период наблюдается тенденция снижения их количества. Кроме того, сложившаяся картина позволяет говорить о наличии тренда как в абсолютных значениях показателей, так и в относительных. Негативным моментом, требующем внимания, является наличие тенденции роста доли погибших и раненых велосипедистов, что на фоне тенденции снижения их абсолютных значений, говорит о том, что снижение количества погибших и раненых велосипедистов идет меньшими темпами, чем остальных категорий незащищенных участников дорожного движения.

Для оценки значимости влияния различных факторов на количество погибших (раненых) в ДТП с незащищенными категориями участников дорожного движения использовались данные об учетных ДТП за тот же период и технология Data Mining⁴. Результаты такого анализа представлены на рисунке 3.

⁴ Statistica 13.3. Computer program. Serial number JRR709H998119TE-A.

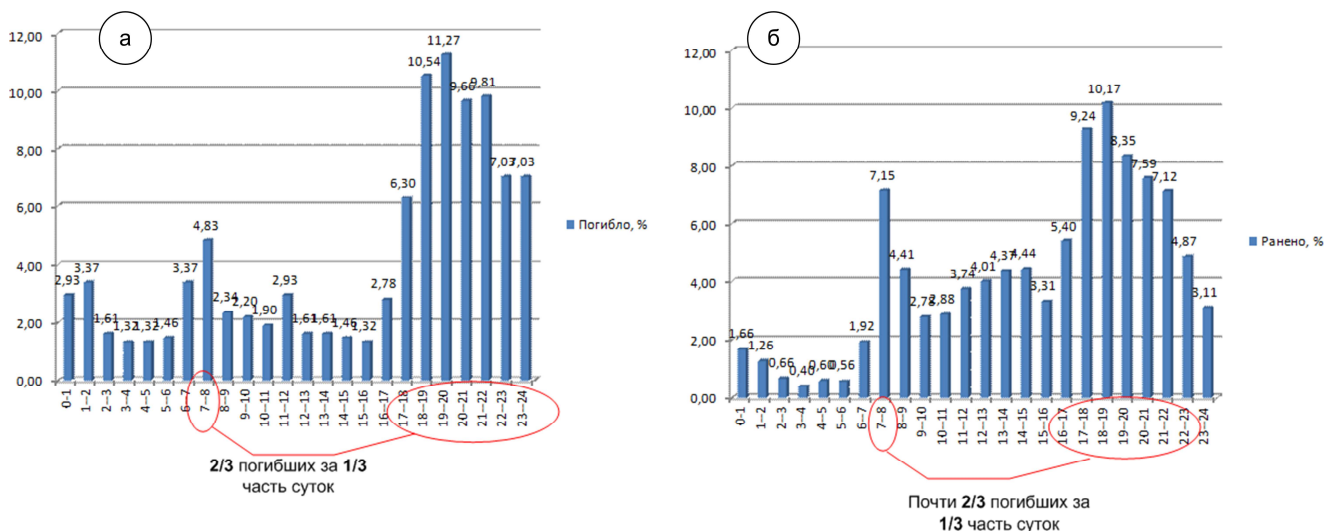


а – количество погибших; б – количество раненых

Рисунок 3. – Факторы, влияющие на количество погибших и раненых в ДТП с участием незащищенных категорий участников дорожного движения, и их значимость

Из рисунка 3 видно, что на количество погибших значимо влияют 5 факторов, на количество раненых – 6. Наиболее значимыми факторами как для числа погибших, так и для числа раненых являются час суток, освещенность, тип местности и принадлежность дороги.

На рисунке 4 представлены результаты анализа аварийности с участием незащищенных категорий участников дорожного движения по времени суток.



а – доля погибших; б – доля раненых

Рисунок 4. – Распределение погибших и раненых по часам суток

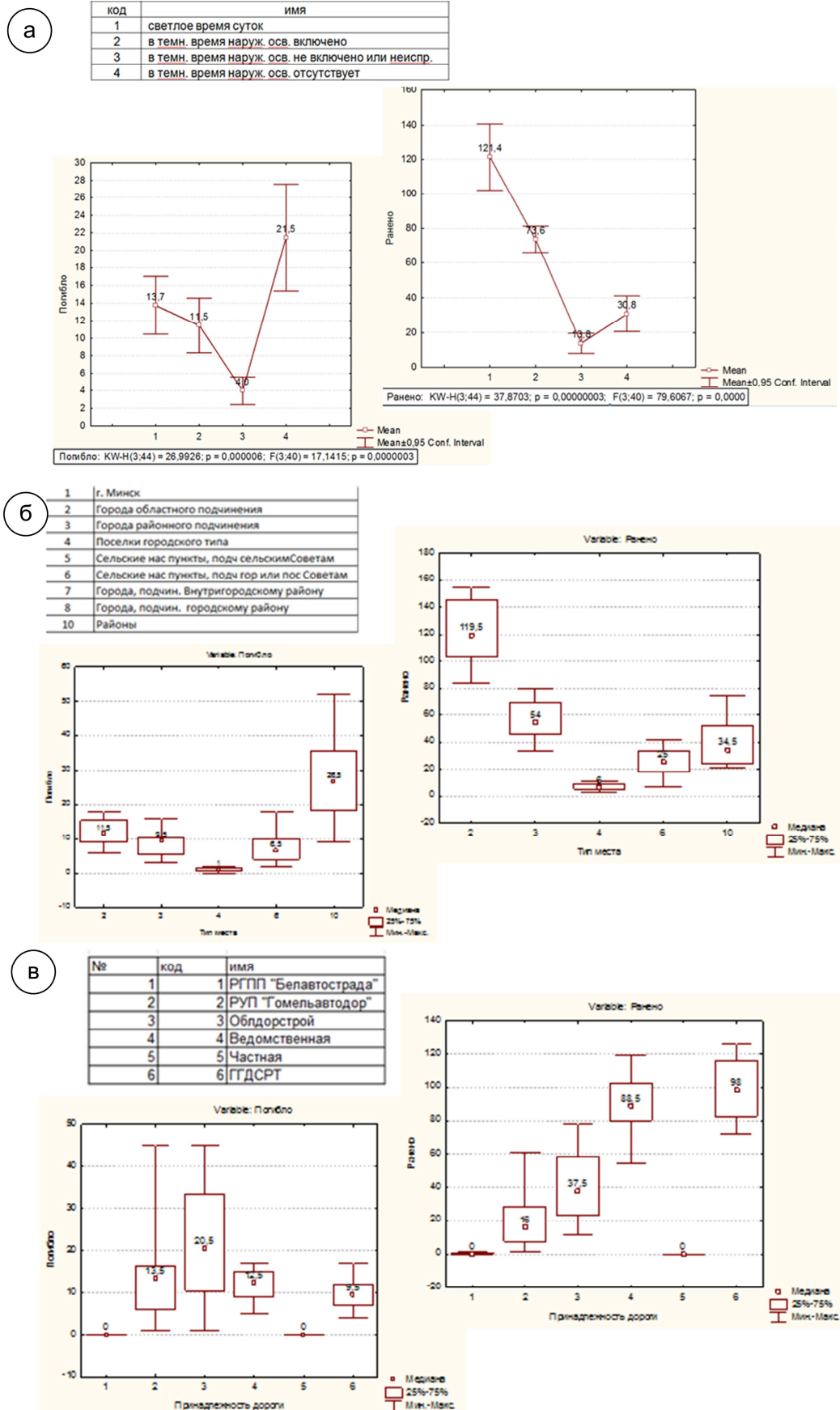
Согласно рисунку 4, порядка 2/3 погибших и раненых приходится на 1/3 часть суток. Наиболее аварийным является вечерний период, который растянут, в отличие от утреннего. Это обусловлено тем, что в утренний «пик» совершаются поездки «дом–работа», в то время как в вечернее время мало кто едет с работы сразу домой. Таким образом, просматривается необходимость снижения частоты использования личных автомобилей, а также «размазывания» пика за счет смещения начала (окончания) рабочих смен и обеденных перерывов.

На рисунке 5 приведены диаграммы размаха количества погибших и раненых в ДТП по освещенности, типу местности и принадлежности дороги. Из рисунка видно:

1. Наибольшее число погибших (примерно 21 ежегодно) приходится на темное время суток на участки дорог, где нет искусственного освещения. Наибольшее число раненых (примерно 121 ежегодно) наблюдается в светлое время суток (рисунок 5, а).

2. Наибольшее число погибших (примерно 26 ежегодно) приходится на районы. Наибольшее число раненых (примерно 119 ежегодно) наблюдается в Гомеле (рисунок 5, б).

3. Наибольшее число погибших (примерно 20 ежегодно) приходится на дороги, обслуживаемые «Гомельоблдорстрой». Наибольшее число раненых (примерно 98 ежегодно) наблюдается на дорогах, обслуживаемых ГГДСРТ (рисунок 5, в).



а – по освещенности; б – по типу местности; в – по принадлежности дороги

Рисунок 5. – Диаграммы размаха количества погибших и раненых в ДТП

При помощи критерия Краскела–Уоллиса установлено, что различия в количестве погибших (раненых) по рассматриваемым группам каждого фактора значимы.

Для всех пар факторов, значимо влияющих на показатели аварийности (см. рисунок 2), были построены таблицы сопряженности. На рисунке 6 приведен пример такой таблицы для пары факторов «тип местности–освещенность».

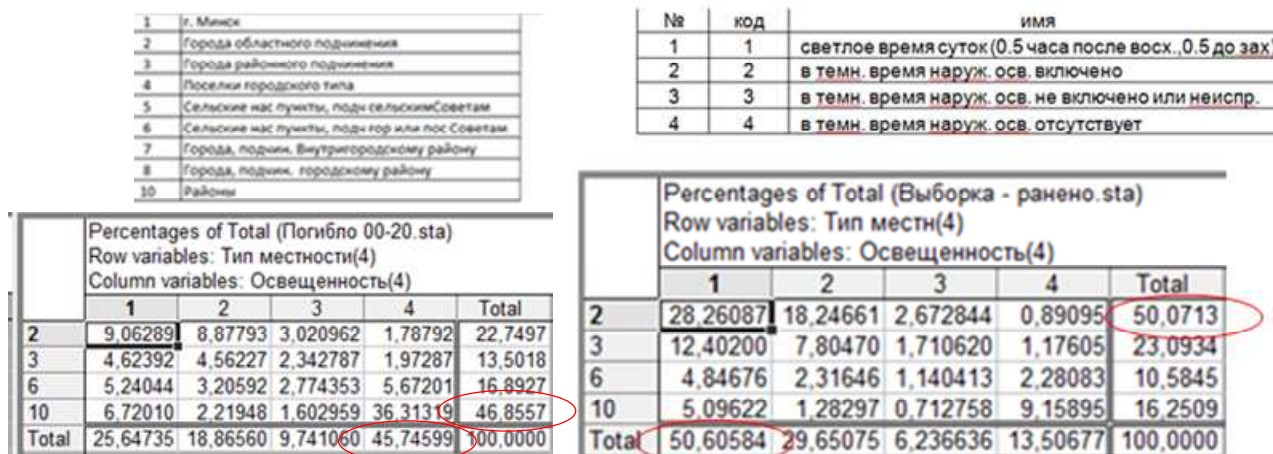


Рисунок 6. – Таблицы сопряженности для пары факторов «тип местности–освещенность»

Согласно рисунку 6:

1. 45,75% погибших в ДТП наблюдается в темное время суток на неосвещенных участках дорог. 46,86% – на типе местности «Районы». 36,3% всех погибших – на типе местности «Районы» в темное время суток на неосвещенных участках дорог.

2. 50,61% раненых в ДТП наблюдается в светлое время суток. 50,07% из всех раненых получили ранения в г. Гомеле. 28,6% всех раненых получили ранение в Гомеле в светлое время суток.

Анализ таблицы сопряженности остальных пар факторов показал:

1. Почти треть человек погибли на районных дорогах, обслуживаемых «Гомельоблдорстрой».
2. Более 40% раненых приходится на г. Гомель на дорогах, обслуживаемых ГГДСРТ.
3. Почти четверть погибших погибли в темное время суток на неосвещенных участках дорог, обслуживаемых «Гомельоблдорстрой».
4. Почти четверть раненых получили ранение в светлое время суток на дорогах, обслуживаемых ГГДСРТ.

Анализ количества погибших по регионам Гомельской области (рисунок 7) показал, что порядка 2/3 всех погибших приходятся на 5–6 регионов.

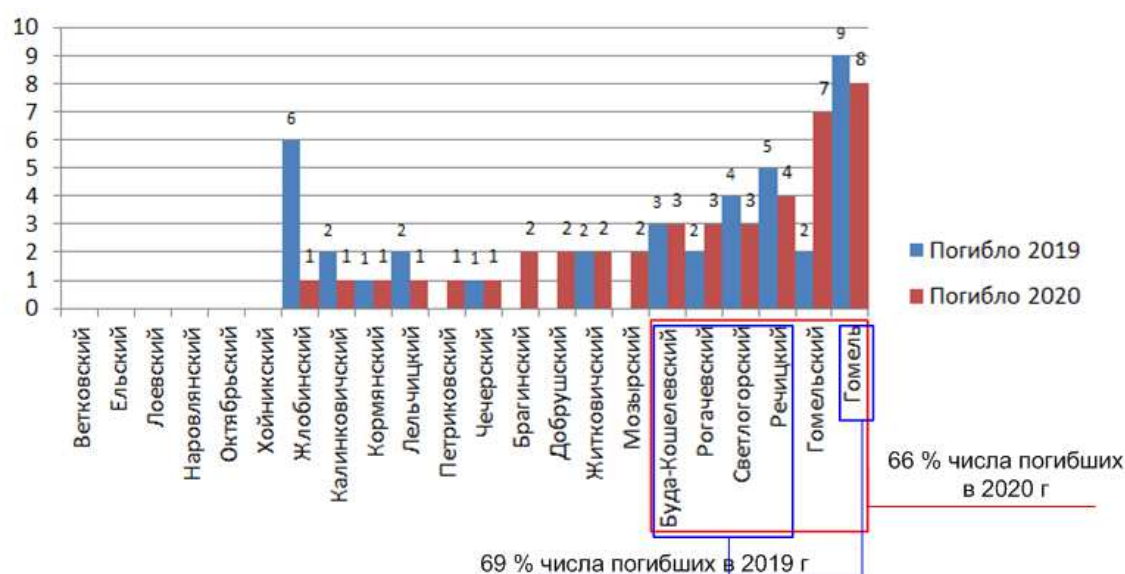


Рисунок 7. – Количество погибших по регионам Гомельской области

Анализ аварийности по элементу дороги (рисунок 8) показывает наличие значимости в различии числа погибших и раненых по элементам дороги, а также необходимость более детального исследования взаимосвязи параметров нерегулируемых пешеходных переходов и показателей аварийности.

Заключение. По результатам исследования влияния различных факторов на показатели аварийности с участием незащищенных категорий участников дорожного движения можно сформулировать следующие основные выводы:

1. Наблюдается тенденция роста доли погибших и раненых велосипедистов в общем числе погибших и раненых незащищенных участников дорожного движения.
2. Наиболее неблагоприятными регионами являются Гомель, Рогачевский, Буда-Кошелевский, Светлогорский и Гомельский районы.
3. Значимо влияют на количество погибших и раненых в ДТП следующие факторы: час, освещенность, тип местности, принадлежность дороги, категория и вид ДТП. Это обуславливает необходимость:
 - разработки мер, дестимулирующих пользование личными автомобилями;
 - проведения топографического анализа по регионам Гомельской области с разработкой мероприятий, в т.ч. обустройства искусственного освещения и светофорного регулирования на пешеходных переходах.

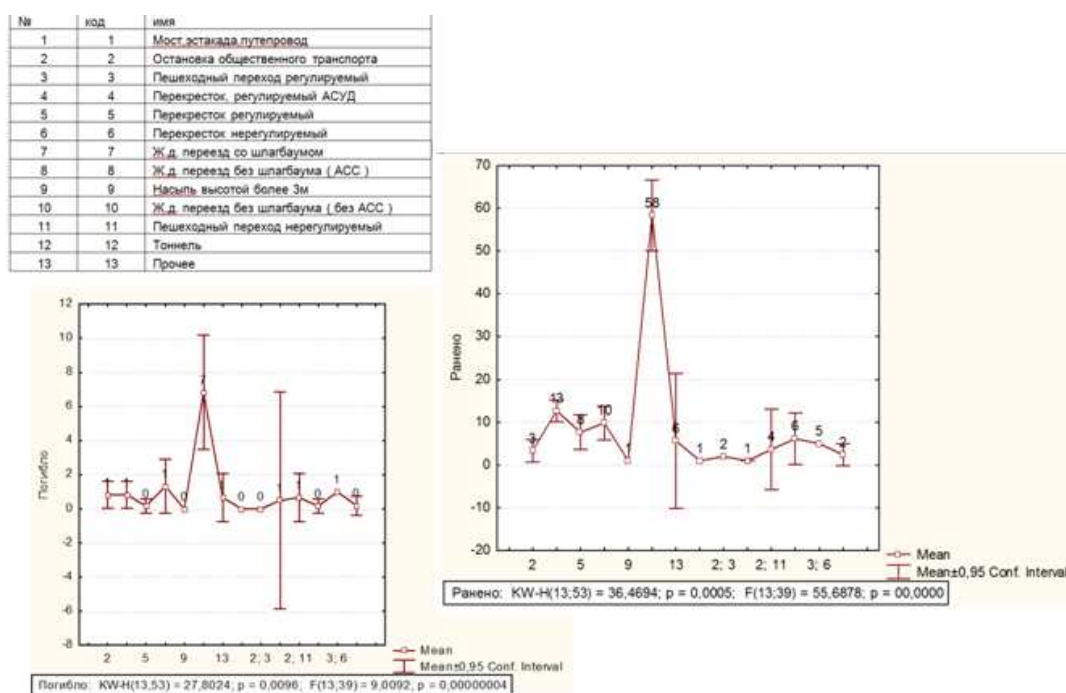


Рисунок 8. – Количество погибших и раненых по элементам дороги

4. Необходимо провести обследование достаточного количества пешеходных переходов с последующим анализом влияния на аварийность разных факторов.

Поступила 11.01.2022

DEVELOPMENT OF ACTIVITIES TO REDUCE ROAD VEHICLE INJURIES INVOLVING UNPROTECTED CATEGORIES ROAD USERS

S. AZEMSHA, I. KRAVCHENYA, A. VORONA

Unprotected road users are pedestrians, cyclists and drivers. With their participation, a significant number of road accidents occur in Belarus. Taking into account the specificity of such categories of road users, the severity of the consequences of these accidents as a rule is high. Therefore, the development of measures to improve traffic safety for unprotected categories of road users will significantly affect the situation with accidents.

On the territory of the Gomel region there is a set of measures to improve road safety «Good road». One of the areas of work stipulated by this document is the development of measures to improve road safety for unprotected categories of road users. This article presents the results of a statistical analysis of the accident rate with the participation of such categories of road users in the Gomel region and, on its basis, suggests ways to reduce the accident rate with the participation of unprotected categories of road users.

Keywords: road safety, pedestrian, cyclist, traffic accident, data mining, contingency tables.

УДК 656.13

ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

канд. техн. наук, доц. С.А. АЗЕМША, В.М. МОРОЗОВ
(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)

Важность общественного транспорта в жизни городов огромна. При этом наличие более привлекательной альтернативы в виде личного легкового автомобиля, а также излишнее его развитие приводят ко многим негативным последствиям: росту аварийности, повышению экономических потерь, снижению качества и продолжительности жизни граждан. Поэтому грамотная политика по развитию общественного пассажирского транспорта позволит получить в перспективе существенные дивиденды.

В данной статье рассматриваются тенденции развития общественного и личного пассажирского транспорта в мире и Республике Беларусь, анализируется сложившаяся ситуация, приводятся доводы в пользу необходимости приоритетного развития общественного пассажирского транспорта.

Ключевые слова: общественный транспорт, индивидуальный транспорт, тенденция, автомобилизация, аварийность, экономические потери.

Введение. Ситуацию на дорогах сегодня в большинстве населенных пунктов Республики Беларусь можно считать удовлетворительной. Это подтверждается практически полным отсутствием систематических заторов, хорошей управляемостью и предсказуемостью ситуации, что обусловлено тем, что Беларусь не достигла критического уровня автомобилизации в 400 автомобилей / 1000 жителей [1, с. 7]. Однако рост автомобилизации, ежегодно наблюдаемый в республике, неизбежно приведет к появлению серьезных проблем, которые имели место в других странах несколько десятилетий назад. Потенциальные преимущества использования частных автомобилей обратились в свою противоположность: горожане стояли в систематических заторах и дышали загрязненным воздухом. Отмеченные обстоятельства оказали серьезное влияние на экономическое развитие городов и состояние городской среды в целом. В этой связи администрации городов были вынуждены искать пути решения этих задач. Анализ их действий позволяет сгруппировать подходы к их разрешению в две основные категории:

– В рамках первой из них ставится вопрос о коренной реконструкции городов, позволяющей адаптировать городское пространство к неограниченному использованию частных автомобилей посредством сооружения разветвленных сетей автомобильных дорог и улиц, а также надлежащих парковочных мощностей. Такой подход приводит к образованию автомобильной зависимости, влечет за собой фундаментальную перестройку всей городской среды, которая становится менее комфортной для жизни.

– Создание в городах интермодальной транспортной системы, формируемой на путях сбалансированного и координированного использования всех видов транспорта. В таких городах системы общественного транспорта эффективны и привлекательны для жителей, а их использование поощряется. Параллельно использование автомобилей ограничивается тем или иным образом в целях предотвращения хронических заторов и минимизации ущерба, наносимого городской среде.

Эти сценарии транспортной политики были реализованы во множестве городов мира и привели к различным результатам. В 1950–1970-е гг. практически во всех городах в США, а также многих городах Великобритании, Франции, Испании и других развитых стран значительные усилия были приложены для приспособления городских транспортных систем и городов к растущему парку автомобилей: к расширению улиц и сооружению скоростных автомобильных магистралей, сооружению многоэтажных паркингов. В результате использование автомобиля стало более удобным, а поездки на общественном транспорте – менее привлекательными. Соответственно, все большее количество горожан получало стимул к покупке автомобилей, а также к увеличению частоты и дальности автомобильных поездок. Рост заторов стал естественным следствием этого. Общественный транспорт, стоявший в общих пробках вместе со всеми прочими автомобилями, не мог составить привлекательную альтернативу автомобильным поездкам. В рамках описанного подхода проблема заторов не была решена, а только усугубилась. Города же, отдавшие предпочтение развитию общественного транспорта, получили качественные транспортные системы, минимизировав негативное влияние на жизнь горожан¹ [1–3].

Важность общественного транспорта в жизни городов подчеркивается во многих работах. Например, в работе [4] отмечается важность места и роли общественного транспорта в жизни жителей городов. Авторы обращают внимание на то, что показатели работы общественного транспорта включены во многие рейтинги, оценивающие качество жизни в городах. Так, в рейтинге «Smart City Index», составленном международной организацией Smart Cities Council, общественный транспорт оценивается по трем направлениям. Один из таких индикаторов – количество поездок на общественном транспорте в год на душу населения. Показатели работы

¹ Das, S. Role of Public Transport in Urban Mobility [Electronic resource] / S. Das and P. Das Gupta // A Case Study of Kolkata. – 2013. URL: <https://www.researchgate.net/publication/299971852>

общественного транспорта также учитываются в Программах оценки качества жизни городов «Green City Index», «Global City Indicators», «Mercer Quality of Living Survey», стандарте ISO 37120 «Sustainable development of communities – Indicators for city services and quality of life», рейтингах «Индекс самых пригодных для жизни городов», «EUROBAROMETER», ежегодной премии «European Green Capital Award». Проанализировав эти рейтинги в части требований к общественному транспорту, авторы [4] предлагают ряд изменений в оценке качества общественного транспорта. В частности, оценивать расстояние до остановочных пунктов, удобство пользования общественным транспортом и инфраструктурой пожилыми людьми и др.

В статье [5] рассматривается влияние на здоровье горожан двух принципиально разных способов перемещения: с помощью личного автомобиля или с помощью общественного транспорта. Авторы выделяют три основных преимущества для здоровья населения при использовании общественного транспорта:

- более низкое загрязнение атмосферы;
- более низкий риск ДТП;
- более высокая физическая активность (больше пеших передвижений).

В Республике Беларусь условия таковы², что доля легковых автомобилей, находящихся в собственности граждан, в общей структуре парка страны составляет около 80%. При этом за период с 2010 по 2020 гг. количество легковых автомобилей, находящихся в собственности граждан, выросло с 2,5 млн до 3,13 млн шт., что эквивалентно среднегодовому приросту 54,2 тыс. шт. Общий уровень автомобилизации достиг в 2020 г. 335 легковых автомобилей / 1000 жителей, из которых новые автомобили составляют только 5,5 легковых автомобилей / 1000 жителей³. По различным причинам производство легковых автомобилей в Беларуси наладить не удалось⁴. Поэтому основной прирост автомобилей приходится за счет импорта подержанных авто из-за рубежа. При этом за период с 2010 по 2020 г было ввезено легковых автомобилей на сумму 13,3 млрд долл.⁵. Учитывая отсутствие производственных мощностей по производству запасных частей, нефти для топлива, масел, автокосметики и прочих необходимых для автомобилей принадлежностей, их наличие также обеспечено импортом из других стран. Так, например, импорт шин для легковых автомобилей вырос с 43,4 млн долл. в 2010 г. до 82,9 млн долл. в 2020 г.⁵. При этом за десятилетний период на импорт только автомобильных шин было потрачено почти 0,7 млрд долл. Следует подчеркнуть, что сальдо внешней торговли товарами за рассматриваемый период всегда было отрицательной величиной и изменялось в диапазоне от -344,5 млн долл в 2012 г. до -9,6 млрд в 2010 г. Поощрение политики импорта в таких условиях не кажется разумным, тем более, что с ростом импорта далеко не самых лучших автомобилей в Беларуси пропорционально будет усугубляться ситуация с аварийностью, экологией и прочими последствиями автомобилизации. Это в свою очередь действует в разрез с обязательствами Республики Беларусь, принятыми в повестке дня в области устойчивого развития на период до 2030 г. (Повестка–2030)⁶.

На фоне отсутствия производства легковых автомобилей в Беларуси развито производство средств общественного транспорта. Такие предприятия, как МАЗ, «Белкоммунмаш», «Неман», производят достаточно современные средства пассажирского общественного транспорта, в т.ч. работающие на электричестве. Использование электрической тяги на фоне запуска Белорусской атомной электростанции позволит существенно снизить негативное воздействие на окружающую среду и стоимость поездок. В таких условиях для Республики Беларусь представляется рациональным развитие транспортной системы по пути сдерживания использования личных автомобилей и создания условий для перехода к использованию общественного транспорта.

Основная часть. Наиболее актуальны вопросы функционирования пассажирского транспорта для мест концентрации людей – для городов. Это обусловлено необходимостью удовлетворения естественных потребностей человека в трудовых и культурно-бытовых передвижениях, а объекты формирования этих потребностей сконцентрированы в населенных пунктах. Удовлетворять такие потребности горожане могут при помощи личного (легковой автомобиль, велосипед и т.д.) или общественного пассажирского транспорта (такси, автобусы, троллейбусы и т.д.). Нужно ли управлять транспортным спросом населения и если нужно, то в сторону какого вида необходимо смещать транспортный спрос? Разница в использовании различных видов транспорта хорошо иллюстрируется рисунком 1: для перевозки одного и того же количества пассажиров (например, 60 человек) необходим 1 автобус (например, МАЗ-203) или 30 легковых автомобилей (средняя наполняемость легкового автомобиля 2 чел.). Очевидно, что выбранный способ перевозки будет оказывать влияние на многие аспекты: облик города, экологическую обстановку, аварийность, экономические затраты, здоровье населения. Так, если такую перевозку надо осуществить на расстояние 100 км, то, например, по топливу можно получить расход:

² Национальный статистический комитет [Электронный ресурс]. URL: <http://dataportal.belstat.gov.by/Indicators/Constructor?key=133214#>

³ <https://auto.tut.by/news/road/633070.html>

⁴ <https://auto.tut.by/news/exclusive/581950.html>

⁵ Национальный статистический комитет. Внешняя торговля [Электронный ресурс]. URL: <http://dataportal.belstat.gov.by/AggregatedDb>

⁶ Цели устойчивого развития в Беларуси [Электронный ресурс]. URL: <https://sdgs.by/>

- 40 л – для МАЗ-203;
 - $10 \cdot 30 = 300$ л – для 30 легковых автомобилей с расходом 100 л / 100 км.
- Колоссальная разница очевидна.

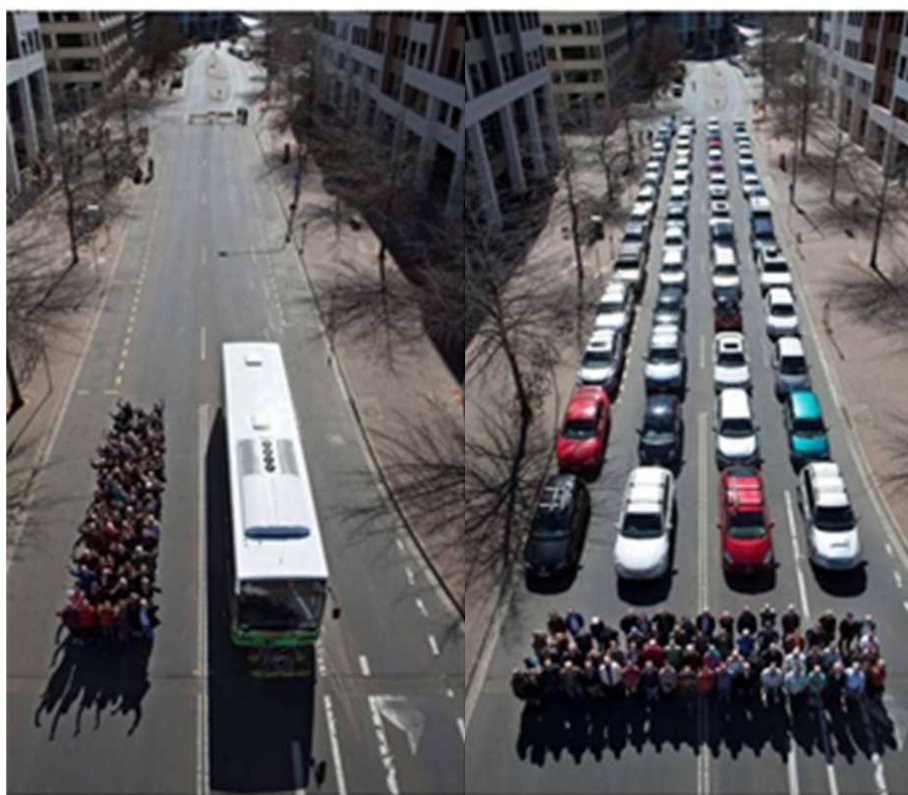


Рисунок 1. – Перевозка пассажиров разными видами пассажирского транспорта

Каждая страна выбирала свой путь развития пассажирского транспорта, устанавливала свои приоритеты в этой сфере, судить по которым можно по динамике изменения соответствующих показателей (индикаторов). К ним можно отнести объем транспортной работы по видам транспорта, количество легковых автомобилей на 1000 жителей, количество выполненных поезд-километров пассажирскими составами, общий пробег легковых автомобилей (автомобиле-километры), общий пробег автобусов и троллейбусов (автомобиле-километры). Некоторые из этих индикаторов отображают изменения в пользовании общественным транспортом, а некоторые – индивидуальным легковым.

В данной работе исследованы изменения этих показателей внутри периода с 2000 по 2019 гг. по разным странам. На рисунке 2 приведены графики изменения таких показателей для Республики Беларусь, а также, для оценки тенденции их изменения, аппроксимирующие прямые.

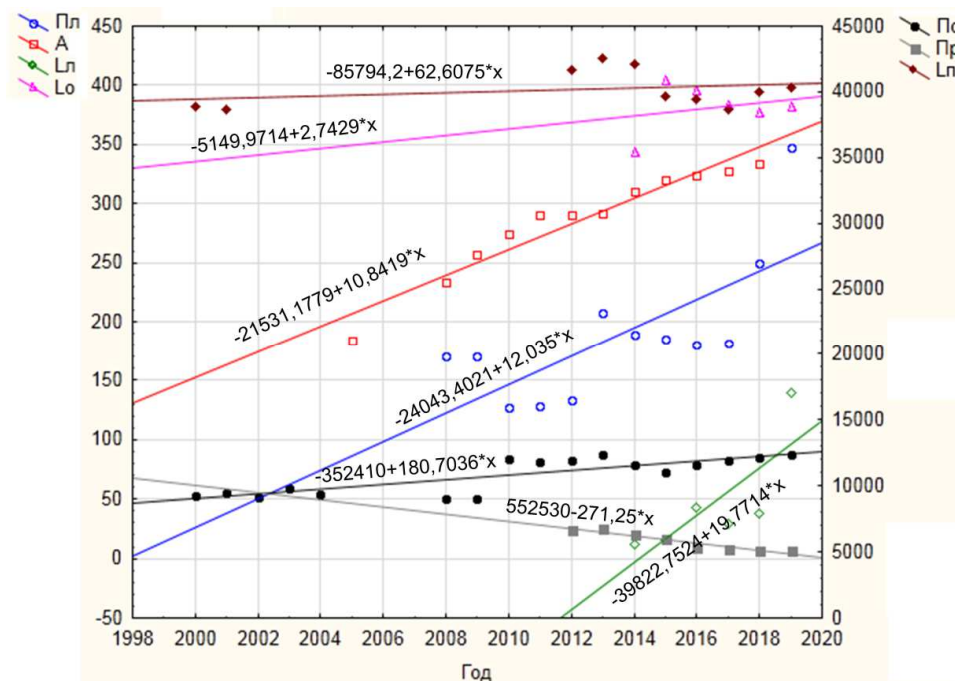
Согласно рисунку 2, по имеющимся данным за рассматриваемый период сложилась тенденция роста всех исследуемых показателей, кроме пассажирооборота внутреннего рельсового транспорта (*Пр*, ежегодное снижение составляет 271,75 млн пасс-км). Кроме того, наибольшими темпами растет пассажирооборот микроавтобусов, автобусов, троллейбусов, млн пасс-км (*По*, ежегодный прирост составляет 180 млн пасс-км), а наименьшими – общий пробег микроавтобусов, автобусов, троллейбусов, млн авт-км (*Lo*, ежегодный прирост – 2,74 млн авт-км).

Для оценки тенденций в изменении анализируемых показателей использовались два критерия:

- коэффициент при независимой переменной линейной аппроксимирующей кривой, показывающий угол ее наклона и отражающий тенденцию изменения показателя за рассматриваемый период в среднем за один год (*Ta*), – далее абсолютная динамика.
- критерий, описанный в предыдущем пункте, отнесенный к значению оцениваемого показателя в начале анализируемого периода и отражающий относительное изменение показателя за рассматриваемый период в среднем за один год к уровню его начального значения (*To*), – далее относительная динамика.

Значения указанных критериев для показателей Республики Беларусь представлены в таблице 1.

Согласно таблице, в Республике Беларусь показатели, характеризующие использование личного транспорта, растут большими темпами, чем показатели, характеризующие использование общественного транспорта.



Pl – пассажирооборот на индивидуальных легковых автомобилях, млн пасс-км; *По* – пассажирооборот микроавтобусов, автобусов, троллейбусов, млн пасс-км; *Пр* – пассажирооборот внутреннего рельсового транспорта, млн пасс-км; *A* – количество индивидуальных легковых автомобилей на 1000 жителей; *Ll* – перевозка рельсовыми пассажирскими транспортными средствами, тыс. поезд-км; *Ll* – общий пробег легковых индивидуальных автомобилей, млн авт-км; *Lo* – общий пробег микроавтобусов, автобусов, троллейбусов, млн авт-км

Рисунок 2. – Динамика изменения показателей оценки развития индивидуального и общественного транспорта

Таблица 1. – Значения критериев оценки динамики изменения показателей развития индивидуального и общественного транспорта в Республике Беларусь

Наименование показателя	Абсолютная динамика, <i>Ta</i> , абс	Относительная динамика, <i>To</i> , %
<i>Показатели, характеризующие использование личного транспорта</i>		
Пассажирооборот на индивидуальных легковых автомобилях, <i>Pl</i> , млн пасс-км	12,04	7,08
Количество индивидуальных легковых автомобилей на 1000 жителей, <i>A</i>	10,84	5,899
Общий пробег легковых индивидуальных автомобилей, <i>Ll</i> , млн авт-км	19,77	164,75
<i>Показатели, характеризующие использование общественного транспорта</i>		
Перевозка рельсовыми пассажирскими транспортными средствами, <i>Ll</i> , тыс поезд-км	62,61	0,16
Общий пробег микроавтобусов, автобусов, троллейбусов, <i>Lo</i> , млн авт-км	2,74	0,80
Пассажирооборот микроавтобусов, автобусов, троллейбусов, <i>По</i> , млн пасс-км	180,70	1,96
Пассажирооборот внутреннего рельсового транспорта, <i>Пр</i> , млн пасс-км	-271,25	-4,09

Для аналогичной оценки тенденций в мире были рассчитаны значения критериев *Ta* и *To* для каждого анализируемого параметра в каждой стране и при помощи критерия Краскела–Уоллеса оценена значимость различий в значениях этих критериев (рисунок 3).

Из рисунка 3 следуют следующие выводы:

1. Значения абсолютной и относительной динамики значительно различаются по показателям развития личного и общественного транспорта ($p = 0 < 0,05$ на рисунке 3, а; $p = 0,0013 < 0,05$ на рисунке 3, в).
2. На фоне общемировой тенденции снижения абсолютной динамики количества пассажиро-километров на личном автомобиле (*Pl*) в Республике Беларусь наблюдается динамика их роста (см. *Pl* на рисунке 3, б). Также в Беларуси наблюдается превышение относительного изменения выполняемых на индивидуальном транспорте пассажиро-километров по сравнению со среднемировым значением этого параметра (*Pl* на рисунке 3, г).

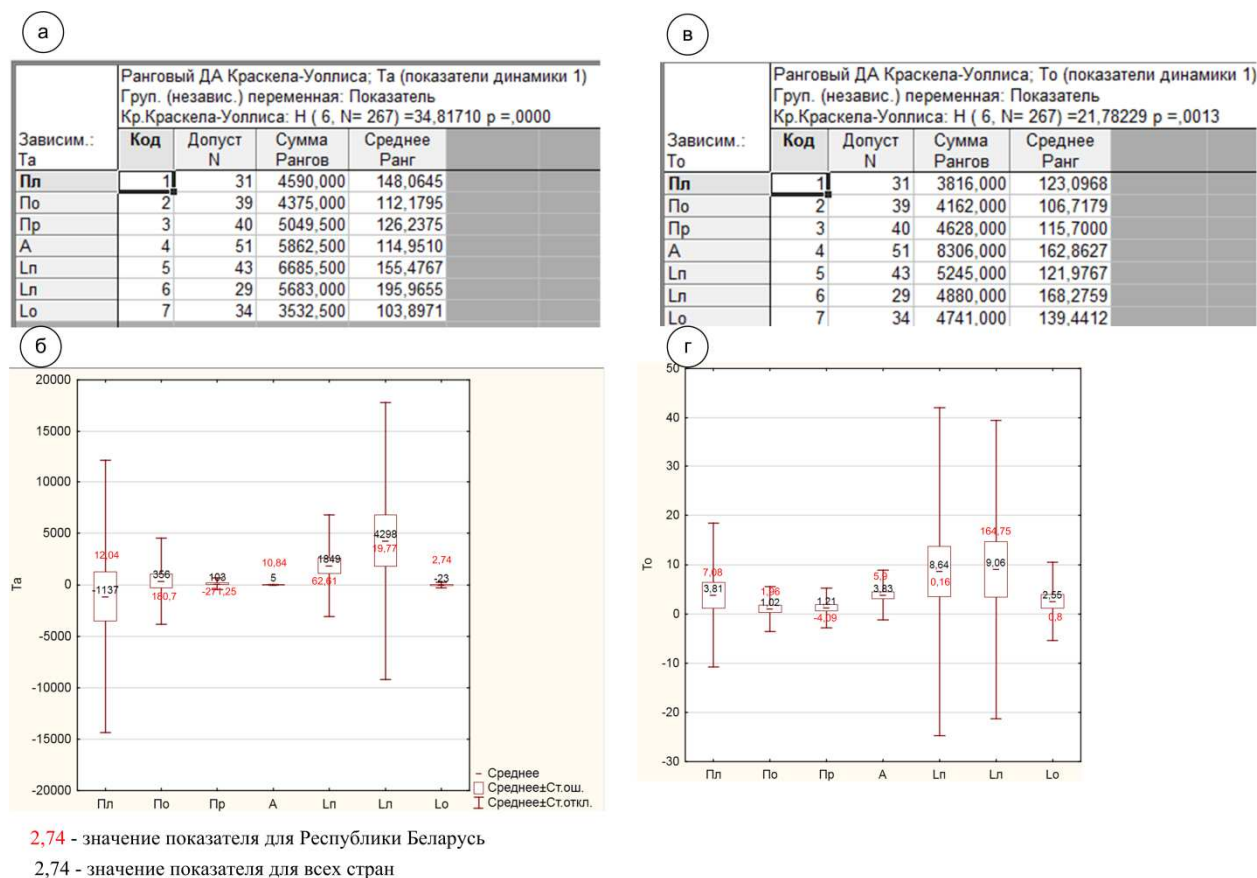
3. Абсолютная и относительная динамика роста автомобилизации в Беларуси выше, чем в среднем по всем странам (*A* на рисунке 3, б, г).

4. Относительная динамика изменения количества выполняемых в Беларуси легковыми автомобилями автомобиле-километров намного превышает среднемировое значение этого же показателя (*Ll* на рисунке 3, г).

5. Выводы, сформулированные в пп. 2–4, говорят о том, что в Республике Беларусь наблюдаются значения показателей, характеризующих развитие индивидуального транспорта, выше среднемировых.

6. Абсолютная и относительная динамика пассажирооборота микроавтобусов, автобусов, троллейбусов в Республике Беларусь схожи со значениями аналогичных показателей для остальных стран (*По* на рисунке 3, б, г).

7. Абсолютная и относительная динамика пассажирооборота внутреннего рельсового транспорта в Республике Беларусь имеют положительное значение на фоне отрицательных значений аналогичных показателей для остальных стран (*Лр* на рисунке 3, б, г), что говорит о большем развитии данного вида перевозок в нашей стране. В то же время в Беларуси наблюдается абсолютная и относительная динамика роста предлагаемых поездо-километров меньшими темпами, чем в среднем по всем странам (*Ln* на рисунке 3, б, г).



а – анализ значимости различий в тенденциях изменения критерия *Ta* показателей развития личного и общественного транспорта методом Краскела–Уоллеса; **б** – диаграммы размаха критерия *To* показателей развития личного и общественного транспорта; **в** – анализ значимости различий в тенденциях изменения критерия *Ta* показателей развития личного и общественного транспорта методом Краскела–Уоллеса; **г** – диаграммы размаха критерия *To* показателей развития личного и общественного транспорта

Рисунок 3. – Анализ тенденций в сфере личного и общественного транспорта

Для количественной оценки тенденций развития пассажирского транспорта в Беларуси относительно общемировых тенденций использовался следующий алгоритм. Для каждого показателя, приведенного в таблице 1, устанавливается значение «1», если значение этого показателя для Республики Беларусь показывает большие по сравнению с мировыми темпами развития общественного транспорта (меньшие темпы развития индивидуального транспорта), и «-1», если наоборот. Результаты таких расчетов представлены в таблице 2.

Приведенные в таблице 2 результаты расчетов показывают, что за рассматриваемый период в Республике Беларусь, по сравнению с другими странами, сложились тенденции изменения показателей, описывающих работу пассажирского транспорта, указывающие на приоритетность развития в Беларуси индивидуального пассажирского транспорта.

Таблица 2. – Расчет направления развития пассажирского транспорта в Беларуси по отношению к остальным странам

Группа показателей	Наименование показателя	Абсолютная динамика, <i>Ta</i> , абс			Относительная динамика, <i>To</i> , %		
		Республика Беларусь	Мир	Оценка	Республика Беларусь	Мир	Оценка
Показатели, характеризующие использование личного транспорта	Пассажирооборот на индивидуальных легковых автомобилях, <i>Пл</i> , млн пасс-км	12,04	-1137	-1	7,08	3,81	-1
	Количество индивидуальных легковых автомобилей на 1000 жителей, <i>A</i>	10,84	5	-1	5,899	3,83	-1
	Общий пробег легковых индивидуальных автомобилей, <i>Lл</i> , млн авт-км	19,77	4298	1	164,75	9,06	-1
Показатели, характеризующие использование общественного транспорта	Перевозка рельсовыми пассажирскими транспортными средствами, <i>Lп</i> , тыс поездо-км	62,61	1849	-1	0,16	8,64	-1
	Общий пробег микроавтобусов, автобусов, троллейбусов, <i>Lo</i> , млн авт-км	2,74	-23	1	0,80	2,55	-1
	Пассажирооборот микроавтобусов, автобусов, троллейбусов, <i>По</i> , млн пасс-км	180,70	356	-1	1,96	1,02	1
	Пассажирооборот внутреннего рельсового транспорта, <i>Пр</i> , млн пасс-км	-271,25	103	-1	-4,09	1,21	1
Итого		-3			-3		
Всего		-6					

Заключение. Проведенный анализ тенденций развития общественного и индивидуального автомобильного транспорта в мире и в Республике Беларусь дает основания полагать, что в Беларуси тенденции развития пассажирского транспорта отличны от общемировых. Это проявляется в росте пользования индивидуальным легковым автомобилем на фоне снижения показателей использования общественного пассажирского транспорта. В тоже время зарубежный опыт показывает, что приоритет должен быть в развитии именно общественного пассажирского транспорта. Это позволяет:

- повысить рейтинг качества жизни в городах и само качество жизни в них;
- экономить общественные затраты;
- уменьшить негативное влияние транспорта на экологию и сберечь здоровье граждан;
- улучшить ситуацию с аварийностью на дорогах;
- следовать принципам устойчивого развития, принятым Республикой Беларусь.

Переориентация транспортной политики Беларусь на стимулирование развития общественного пассажирского транспорта и дестимулирование использования личных автомобилей позволит достигнуть успехов в отмеченных направлениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вучик, Р. Вукан. Транспорт в городах, удобных для жизни / Вукан Р. Вучик ; пер. с англ. А. Калинина под науч. ред. М. Блинкина. – М. : Территория будущего, 2011. – 570 с.
2. Аземша, С.А. Анализ способов решения транспортных проблем городов северной и южной Америки / С.А. Аземша, В.С. Стрельченко // Вестн. Белорус. гос. ун. трансп. Наука и транспорт. – 2014. – № 1(28). – С. 45–51.
3. Аземша, С.А. Некоторые пути решения транспортных проблем городов Республики Беларусь / С.А. Аземша, В.С. Стрельченко // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 12 Междунар. науч.-практ. конф. / редкол.: Б.М. Хрусталева [и др.]. – Минск : БНТУ, 2014. – Т. 3. – С. 220–222.
4. Komsta, Henryk. The Role of City Public Transport in Creating the Mobility of Its Residents / Henryk Komsta, Paweł Drożdżel, Marek Opielak // AUTOBUSY – Technika Eksploatacja Systemy Transportowe. – 2019. – Vol. 20. – Pp. 393–397. DOI: <https://doi.org/10.24136/atest.2019.073>.
5. Soo, ChenKwan. Chapter six. Public transport and health / Soo ChenKwan, Jamal HishamHashim // Advances in Transportation and Health. Tools, Technologies, Policies, and Developments. – 2020. – P. 149–173. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819136-1.00006-1>.

REFERENCES

1. Vuchik, R. Vukan. (2011). *Transport v gorodah, udobnyh dlya zhizni* [Transport in livable cities]. Moscow: Territoriya budushchego. (In Russ.).
2. Azemsha, S.A., & Strel'chenko, V.S. (2014). Analiz sposobov resheniya transportnykh problem gorodov severnoj i yuzhnoj Ameriki [Analysis of ways to solve transport problems of cities in North and South America]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta* [Bulletin of the Belarusian State University of Transport], 1(28), 45–51. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Azemsha, S.A., & Strel'chenko, V.S. (2014). Nekotoryye puti resheniya transportnykh problem gorodov Respubliki Belarus' [Некоторые пути решения транспортных проблем городов Республики Беларусь]. *Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu, ekonomike* [Science – education, production, economics], Vol. 3, 220–222. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Komsta, Henryk, Drożdziel, Paweł, & Opielak, Marek. (2019). The Role of City Public Transport in Creating the Mobility of Its Residents. *AUTOBUSY – Technika Eksploatacja Systemy Transportowe*, Vol. 20, 393–397. (In Engl.). DOI: <https://doi.org/10.24136/atest.2019.073>
5. Soo, ChenKwan, & Jamal, HishamHashim. (2020). Chapter six. Public transport and health. *Advances in Transportation and Health. Tools, Technologies, Policies, and Developments*, 149–173. (In Engl.). DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819136-1.00006-1>

Поступила 22.09.2021

**JUSTIFICATION OF THE DIRECTION OF DEVELOPMENT
OF PASSENGER TRANSPORT IN THE REPUBLIC OF BELARUS**

S. AZEMSHA, V. MOROZOV

The importance of public transport in urban life is enormous. At the same time, the presence of a more attractive alternative in the form of a personal car, as well as its excessive development, lead to many negative consequences: an increase in accidents, an increase in economic losses, a decrease in the quality and life expectancy of citizens. Therefore, a competent policy for the development of public passenger transport will make it possible to receive substantial dividends in the future.

This article examines the trends in the development of public and personal passenger transport in the world and in the Republic of Belarus, analyzes the current situation, provides arguments in favor of the need for priority development of public passenger transport.

Keywords: public transport, individual transport, trend, motorization, accidents, economic losses.

УДК 656.13.05

СНИЖЕНИЕ НЕПРОДУКТИВНЫХ ЗАТРАТ МАРШРУТНОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА СЕКТОРАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

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

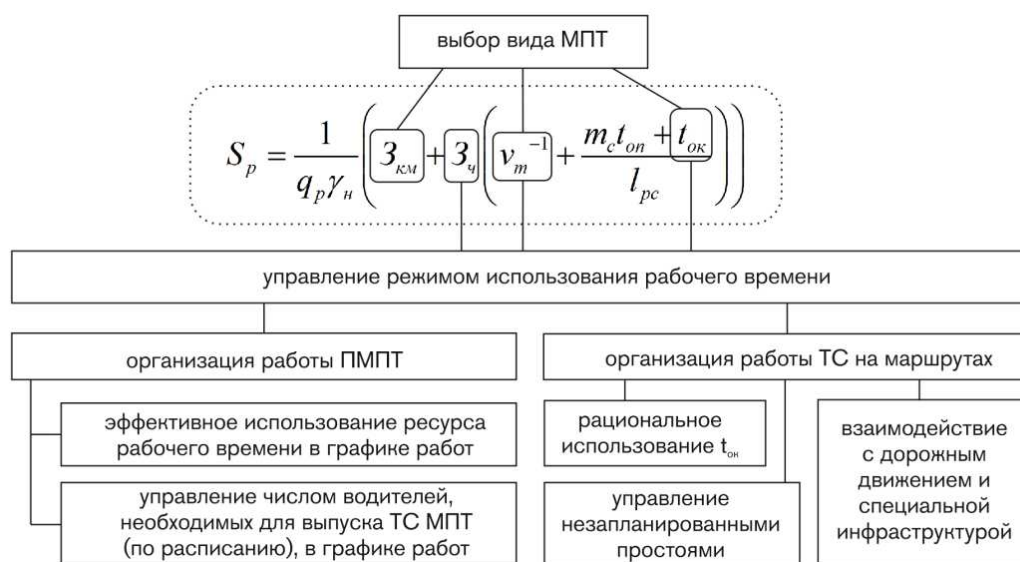
Рассмотрены вопросы снижения непродуктивных затрат маршрутного пассажирского транспорта с целью повышения эффективности на основе совершенствования процесса организации перевозок пассажиров, эксплуатационной работы с учетом особенностей различных видов транспорта. Представлены методы, методики и алгоритмы, предназначенные для реализации отдельных предложений.

Ключевые слова: маршрутный пассажирский транспорт, непродуктивные затраты, секторальный метод, повышение эффективности работы.

Введение. Маршрутный пассажирский транспорт (далее – МПТ) обеспечивает основные передвижения населения, имеет неоценимое значение в экономическом развитии городов, улучшении экологической обстановки, сокращении истощения природных ресурсов, повышении безопасности участников дорожного движения, обеспечении устойчивой мобильности населения и имеет большое социальное значение. Большая роль МПТ и дальнейшее его развитие вызывают определенный научный интерес в области проработки вопросов повышения эффективности МПТ (далее – ЭМПТ), обеспечиваемой совершенствованием процессов организации перевозок на основе модернизации деятельности эксплуатационных предприятий МПТ (далее – ПМПТ).

Основная часть. Возможные пути повышения ЭМПТ. Было проведено детальное исследование существующих методов и алгоритмов организации эксплуатационной работы ПМПТ, в результате которого введено понятие непродуктивных затрат в отношении необязательных затрат, возникающих в результате определенных недостатков и несовершенств организации их работы, обусловленных отсутствием научно обоснованных методик, отвечающих современным условиям.

Были предложены новые возможные пути повышения ЭМПТ, заключающиеся в устранении причин возникновения непродуктивных затрат ПМПТ, которые представлены на рисунке в виде схемы, иллюстрированной с использованием зависимости для определения удельной себестоимости перевозок на единицу транспортной работы S_p как важнейшего показателя эффективности при выполнении перевозок пассажиров, предложенной в [1].



q_p – пассажироместность ТС, пасс.; γ_n – коэффициент использования пассажироместности; $3_{км}$ – переменные затраты на 1 км пробега ТС, BYN/км; $3_{ч}$ – постоянные затраты на 1 ч работы ТС, BYN/ч; v_m – техническая скорость ТС, км/ч; m_c – количество остановочных пунктов; $t_{он}$ – время нахождения ТС на остановочных пунктах, ч; $t_{ок}$ – время нахождения ТС на конечных станциях, ч; $l_{рс}$ – средняя дальность поездки пассажира, км

Рисунок. – Возможные пути повышения ЭМПТ

Согласно рисунку, снижение непродуктивных затрат в конечном счете приведет к снижению удельных затрат на 1 км пробега ТС и 1 ч работы ТС и повышению ЭМПТ.

Управление режимом использования рабочего времени организацией работы ПМПТ.

1. Эффективное использование ресурса рабочего времени водителей в графике работ, режима использования рабочего времени (далее – РИРВ) реализовано авторским секторальным методом (далее – СМ), который организовал работу водителей таким образом, что это привело к снижению непродуктивных затрат, ассоциированных с оплатой сверхурочных работ одних водителей при неполном использовании фонда рабочего времени другими.

Разработанный СМ организации и управления работой водителей и ТС при работе на сформированной маршрутной сети и по заданным расписаниям движения заключается в совмещении и чередовании маршрутов внутри сектора и обеспечивает равномерную сменяемость (чередование) водителей по этим маршрутам, учитывая среднюю продолжительность рабочей смены водителя на маршрутах, входящих в сектор.

В рамках СМ разработаны и проверены математические модели работы ТС и водителя на маршрутах ПМПТ, введено понятие сектора как технико-экономической единицы, сформированной по принципу обеспечения равноценной производственной нагрузки, заключающемуся в совмещении в секторе именно таких маршрутов (или их выпусков), которые при равномерном чередовании по ним водителей в течение месяца будут компенсировать имеющиеся неравномерности продолжительности рабочих смен по отдельным маршрутам, и учитывающему при этом среднюю продолжительность рабочей смены по каждому из совмещаемых маршрутов.

Сектор рассматривается как объединение маршрутов и водителей, каждый из которых взаимозаменяем в границах сектора. При этом высокая степень их совместимости позволяет говорить о секторе как о некоей универсальной среде, обеспечивающей выполнение принципа равноценности на экономическом уровне и конгруэнтности на транспортном. Основной принцип работы внутри сектора – «коммутация» маршрутов и «коммутация» водителей, закрепленных за этим сектором. Таким образом, сектор является управляемой системой «ТС–водитель–маршрут–режим работы», обладающей возможностями контролировать и управлять состоянием отдельных элементов сектора, а также осуществлять оперативный мониторинг, выявлять и оперативно разрешать проблемы, возникающие внутри сектора, анализировать эффективность.

Закономерности, гарантируемые при использовании СМ на основе соблюдения правил проектирования и формирования секторов, формулируются в виде законов, которые отражают свойства системы «ТС–водитель–маршрут–режим работы»: закон изотропности продолжительности рабочего времени внутри системы сектора, закон сохранения равенства пробега внутри системы сектора.

Спроектированные сектора отвечают следующим требованиям: комплементарность (возможность объединения маршрутов в сектор по признаку общности значимых параметров), масштабируемость (возможность увеличения количества элементов сектора за счет маршрутов, их протяженности и связей на основе учета значимых критериев, что обеспечит сохранение стабильности свойств сектора), производительности (обеспечение требуемых значений эффективности работы, пропускная способность сектора), управляемость (обеспечение возможности как централизованного, так и децентрализованного управления секторами, доступного мониторинга состояния сектора, планирования их развития, возможности эффективного управления человеческим ресурсом сектора), готовность (способность, характеризующая периодом времени, за который сектор может быть введен в работу, то есть может быть развернута работа в секторе), отказоустойчивость (способность быстрого реагирования на отказ отдельных элементов сектора, возможность замены в случае поломки ТС или невыхода водителя), безопасность (способность сектора обеспечивать высокий уровень безопасности путем подбора водителей на основе сочетания рейтинга безопасности водителя и рейтинга безопасности сектора, что условно является элементом проактивного подхода к обеспечению безопасности движения и перевозок), надежность.

Учитывая высокую степень гетерогенности маршрутов (как правило), проектирование секторов – сложная и ответственная задача, которая решается с помощью разработанной методики проектирования секторов (далее – МПС), обеспечивающей формирование равнозначных по своим параметрам секторов и реализуемой с помощью разработанного алгоритма формирования сектора. При этом важным условием объединения маршрутов в сектора является принцип единства используемых в каждом секторе ТС по признаку схожести параметров ТС одного типа, вида, класса пассажировместимости, схемы, концепции реализации, что гарантирует сектору универсальность на основе взаимозаменяемости ТС и водителей.

Подробно СМ и порядок применения МПС описаны в [2].

2. Управление числом водителей, необходимых для выпуска ТС МПТ на линию по заданному расписанию, для снижения непродуктивных затрат, ассоциированных с оплатой в повышенном размере работы водителей, привлекаемых к работе для компенсации неравномерности распределения водителей по сменам и числам месяца.

В рамках СМ разработана методика составления графика отпусков водителей, отличающаяся определением дня начала трудового отпуска водителя с детализацией до 10-дневного периода (декады) в рамках каждого

месяца, что позволяет равномерно распределить 39-дневные отпуска водителей с учетом сезонности по принципу «занятости свободных ячеек», что приводит к значительному снижению степени неравномерности распределения водителей, не находящихся в трудовом отпуске, по числам каждого месяца.

В рамках СМ разработана методика назначения режимов сменности водителей на основе использования формализованных шаблонов графиков их работы, которая исключает интерференцию последовательностей чередования водителей по сменам, устраняя внутримесячную неравномерность числа водителей, необходимых для выпуска ТС МПТ.

Для реализации методики предложен способ формализованного представления режимов работы водителей, закрепленных за ТС (далее — команда), основанный на выделении в режиме сменности циклически повторяющихся последовательностей (рабочих циклов) и сведении их в матрицу (1) шаблона секвенции:

$${}^m_n G_d = \begin{pmatrix} g_{11} & \dots & \dots & \dots & g_{1d} \\ \dots & \dots & g_{ij} & \dots & \dots \\ g_{n1} & \dots & \dots & \dots & g_{nd} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где i — порядковый номер водителя;

j — порядковый номер рабочего дня в цикле;

g_{ij} — признак режима работы водителя (условное обозначение вида смены);

m — уникальный номер (индекс, обозначение);

n — число водителей команды;

d — продолжительность цикла.

Оригинальная типология режимов работы команд сформирована на основе выделения всех возможных неповторяющихся последовательностей серий рабочих смен и выходных дней в шаблоны секвенций, построенные по принципу гармонизации графика работ водителей, обеспечивающие не только соблюдение режимов труда и отдыха, но и равномерное распределение водителей по календарным дням месяца, объединенные по признаку в классы (2), типичные представители которых приведены в [3]:

$$\begin{aligned} {}_3 G_{12} &= \{ {}^A_3 G_{12}; {}^B_3 G_{12}; {}^C_3 G_{12}; {}^D_3 G_{12} \}, \\ {}_2 G_{12} &= \{ {}^E_2 G_{12}; {}^F_2 G_{12}; {}^G_2 G_{12}; {}^H_2 G_{12}; {}^I_2 G_{12}; {}^J_2 G_{12} \}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для определения режимов работы ТС и водителей каждый сектор описывается условной формулой сектора, отражающей количество и тип шаблонов секвенций. Для формирования формулы сектора разработан алгоритм, отличающийся подбором из числа кодированных шаблонов секвенций в соответствии с принципами СМ [4].

В дальнейшем при составлении графика работ базовая сетка графика формируется из шаблонов с повторением элементов рабочего цикла водителя. Подбор и расстановка водителей на каждое ТС осуществляются только в пределах сформированных формулой сектора сеток графика с учетом налагаемых ограничений (наличие допуска для работы на ТС, которыми должен быть укомплектован сектор, наличие допуска для работы на маршрутах сектора, в перспективе — с учетом показателей рейтинга безопасности сектора, основанного на учете приведенного количества ДТП, произошедших на маршрутах сектора, с учетом показателей рейтинга профессиональной безопасности водителя и др.).

Управление РИРВ организацией работы ТС на маршрутах. Универсальность принципов СМ позволяет использовать его для снижения непродуктивных затрат путем сокращения избыточного времени нахождения ТС на конечных станциях в разработанной автором модели (3) работы ТС на маршруте.

$$\begin{cases} t_{об} = t_{окА} + t_{АБ} + t_{окБ} + t_{БА}, \\ t_{окА} = t_{окоА} + t_{окдА}, \\ t_{окБ} = t_{окоБ} + t_{окдБ}, \\ t_{об} = A_m I, \end{cases}, \quad (3)$$

где $t_{об}$ — полное время оборота ТС на маршруте, мин;

$t_{окА}, t_{окБ}$ — время стоянки на ст. А и ст. Б соответственно, мин;

$t_{окоА}, t_{окоБ}$ — время обязательной стоянки на ст. А и ст. Б соответственно, мин;

$t_{окдА}, t_{окдБ}$ — время дополнительной стоянки на ст. А и ст. Б соответственно, мин;

$t_{АБ}, t_{БА}$ — время движения от ст. А к ст. Б и от ст. Б к ст. А соответственно, мин;

A_m – количество ТС на маршруте, ед.;

I – интервал движения на маршруте, мин.

Исследованием установлено, что время стоянок $t_{окдА}$ и $t_{окдБ}$ не может быть менее минимального времени, необходимого для санитарно-бытовых нужд водителя, компенсации возможного опоздания по прибытию, отправления ТС в следующий рейс по расписанию, на зарядку бортовых накопителей энергии новых видов МПТ [5–7]. Введено понятие времени дополнительных стоянок $t_{окдА}$ и $t_{окдБ}$, возникающих сверх $t_{окдА}$ и $t_{окдБ}$ при обеспечении установленного интервала I , что приводит к снижению средней эксплуатационной скорости v , и росту непродуктивных затрат.

Возможность применения СМ для организации работы ТС на маршрутах МПТ заключается в выделении и секторальном совмещении маршрутов, имеющих общие сегменты, на основе правил «коммутации» и совмещения маршрутов внутри сектора с сохранением обязательного последовательного чередования работы по ним, рациональным распределением водительских и технических ресурсов сектора. Реализация СМ для организации работы ТС на маршрутах МПТ осуществляется путем выделения на каждом маршруте внутри сектора совместных сегментов (участков маршрута), которые обслуживаются по принципу равенства сетевого интервала с гарантированным исключением эффекта Нониуса, что влечет за собой не только равномерное распределение производственной нагрузки, но и снижает экономические потери пассажиров, заключающиеся в трате их времени на излишнее ожидание ТС МПТ на остановочных пунктах, при этом предотвращаются перегрузки ТС и не допускается усложнение работы водителей на маршрутах. Такие инфраструктурные совмещения маршрутов (и даже видов МПТ) также являются решением для повышения пропускной способности и производительности сектора за счет минимизации $t_{окдА}$ и $t_{окдБ}$ при выполнении назначенных условий для применения СМ для организации работы ТС на маршрутах МПТ. Ожидаемый экономический эффект от обслуживания каждого двух маршрутов СМ при выполнении необходимых условий выражается для автобуса на 10-летний период (жизненный цикл одного ТС) в текущих ценах 1 662 500 BYN, для троллейбуса на 15-летний период – 2 418 750 BYN, для трамвая на 30-летний период – 47 737 500 BYN.

С целью снижения непродуктивных затрат, связанных с оплатой простоев водителей ТС МПТ, предлагается создание службы аварийных комиссаров, что сократит время простоев ТС МПТ, для чего предложен четкий алгоритм действий всех служб, разработаны концепция, структура и порядок работы службы аварийных комиссаров, наделенных правом оформления ДТП (без пострадавших), не привлекая сотрудников ГАИ, подготовлены предложения о внесении необходимых изменений, наделяющих аварийных комиссаров соответствующими юридическими полномочиями по оформлению ДТП.

С целью повышения ЭМПТ путем увеличения технической скорости v_m при улучшении условий взаимодействия с дорожным движением и специальной инфраструктурой выполнено детальное изучение особенностей взаимодействия ТС всех видов МПТ с организацией дорожного движения, которое подробно изложено в [5], и разработана концепция по обеспечению их продуктивного взаимодействия.

Выполнено детальное изучение эксплуатационных возможностей новых, инновационных видов ТС МПТ с дополнительным категорированием видов и оценкой их влияния на ЭМПТ, с разработкой концепции выбора МПТ с учетом эффективности вложений в развитие, эксплуатацию, реновацию инфраструктуры, приобретение ТС для работы на маршруте с дифференцированным учетом срока службы, оценкой уровня эксплуатационных расходов, а также методики повышения ЭМПТ за счет рационального использования РИРВ, которые описаны в [5–8], определены границы эффективного использования электробусов различных концепций. Также стоит отметить, что перспективным является развитие инновационных видов электрического МПТ, являющегося приоритетным для нашей страны, благодаря развитию атомной энергетики. Для массовых перевозок пассажиров преимущество имеет использование троллейбусов ИМС, обеспечивающих равномерную распределенную нагрузку на электрическую сеть в течение суток, не увеличивающих время обязательных стоянок на конечных станциях, что не вызывает рост непродуктивных затрат, и не требующих дополнительных затрат времени на длительную зарядку и дополнительных вложений в инфраструктуру, а также рельсовых видов МПТ (легкорельсового транспорта и трамваев) в соответствующих условиях.

Заключение. Введено использование понятия непродуктивных затрат, определены пути повышения ЭМПТ путем управления непродуктивными затратами СМ и РИРВ, разработаны математические модели работы водителя и ТС на маршруте, введены понятия основного и дополнительного времени стоянок ТС на конечных станциях. В результате применения СМ работа ТС и их водителей организовывается так, что это обеспечивает сокращение уровня непродуктивных затрат на оплату сверхурочного времени на 70–95%. СМ повышает информированность водителей и улучшает осведомленность о типичных дорожно-транспортных ситуациях на маршрутах, положительно влияет на повышение безопасности дорожного движения. Для реализации СМ разработана МПС, алгоритм формирования сектора и алгоритм формирования формулы сектора для составления графиков работы ТС и водителей СМ, режимам труда и отдыха водителей, построенных при этом с учетом принципа социальной справедливости, а также для обеспечения надежности водителей путем соблюдения режимов труда и отдыха водителей, равномерного предоставления непрерывных периодов отдыха для восстано-

ления работоспособности. Разработана методика применения СМ для секторального обслуживания маршрутной сети, которая позволяет снизить непродуктивные и эксплуатационные затраты ПМПТ, повысить ЭМПТ. Наличие доступных и понятных авторских методик позволяет в значительной степени сократить временные и стоимостные затраты внутри сектора и ПМПТ в целом, что несомненно переводит понятие «управление» ПМПТ на качественно новый уровень.

Поскольку основной причиной возникновения непродуктивных затрат являются недостатки и несовершенства в организации работы ПМПТ, повышение ЭМПТ достигается внедрением СМ. При этом стоит отметить, что СМ является не капиталоемким, а наукоемким, поэтому он внедряется легко и оперативно, в связи с чем можно ожидать не только значимых, но и быстрых результатов по повышению ЭМПТ.

Стоит заметить, что принципы СМ справедливы и для беспилотных ТС, являющихся перспективными для развития транспортного сектора нашей страны. Для них будет применима и МПС, уравнивающая пробеги ТС, тем самым балансирующая межремонтные интервалы во времени, обеспечивающая возможность прогнозирования и рационального планирования технического обслуживания и ремонта, равномерный износ и производственную нагрузку на беспилотные ТС, справедливы алгоритмы и положения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Седюкевич, В.Н. Автомобильные перевозки грузов и пассажиров : учеб. пособие / В.Н. Седюкевич, А.Я. Андреев. – Минск : РИВШ, 2020. – 328 с.
2. Семченков, С.С. Повышение эффективности работы маршрутного пассажирского транспорта применением секторального метода / С.С. Семченков, Д.В. Капский // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии : сб. науч. ст. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 170–185.
3. Капский, Д.В. Некоторые вопросы системного подхода к планированию работы водителей городского пассажирского транспорта / Д.В. Капский, Е.Н. Кот, С.С. Семченков // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов / науч. ред. С.А. Ваксман. – Екатеринбург : АМБ, 2020. – С. 269–280.
4. Семченков, С.С. Методика автоматизации процессов организации работы водителей маршрутных транспортных средств / С.С. Семченков, Д.В. Капский // Новости науки и технологий. – Минск : БелИСА, 2021. – С. 74–82.
5. Капский, Д.В. Организация дорожного движения с учетом маршрутного пассажирского транспорта / Д.В. Капский, С.С. Семченков, Е.Н. Кот // Экономика Северо-Запада: Проблемы и перспективы развития / Ин-т проблем регион. экономики РАН. – СПб. : ИПРЭРАН, 2021. – С. 66–77.
6. Маршрутный транспорт городов Полоцка и Новополоцка: эффективность и тенденции развития / Д.В. Капский [и др.]. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2021. – 308 с.
7. Развитие городского транспорта в городах Полоцке и Новополоцке / Д.В. Капский [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – 2020. – № 11. – С. 85–97.
8. Оценка состояния транспортной системы городов Полоцка и Новополоцка / Д.В. Капский [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – 2020. – № 11. – С. 98–102.

REFERENCES

1. Sedyukevich, V.N. & Andreyev, A.Ya. (2020). *Avtomobil'nyye perevozki gruzov i passazhirov* [Automobile transportation of goods and passengers]. Minsk: RIVSH. (In Russ.).
2. Semchenkov, S.S. & Kapskiy, D.V. (2021). Povysheniye effektivnosti raboty marshrutnogo passazhirskogo transporta primeneniym sektoral'no-go metoda [Improving the efficiency of the route passenger transport using the sectoral method]. *Transport i transportnyye sistemy: konstruirovaniye, ekspluatatsiya, tekhnologii* [Transport and transport systems: design, operation, technologies] (170–185). Minsk: BNTU. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Kapskiy, D.V., Kot, Ye.N. & Semchenkov, S.S. (2020). Nekotoryye voprosy sistemnogo podkhoda k planirovaniyu raboty voditeley gorodskogo passazhirskogo transporta [Some issues of a systematic approach to planning the work of drivers of urban passenger transport]. *Sotsial'no-ekonomicheskiye problemy razvitiya i funktsionirovaniya transportnykh sistem gorodov* [Socio-economic problems of development and functioning of transport systems of cities] (269–280). Yekaterinburg: AMB. (In Russ.).
4. Semchenkov, S.S. & Kapskiy, D.V. (2021). Metodika avtomatizatsii protsessov organizatsii raboty voditeley marshrutnykh transportnykh sredstv [Methodology for automating the processes of organizing the work of drivers of route vehicles]. *Novosti nauki i tekhnologii* [Science and Technology News] (74–82). Minsk: BelISA. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Kapskiy, D.V., Semchenkov, S.S. & Kot, Ye.N. (2021). Organizatsiya dorozhnogo dvizheniya s uchetom marshrutnogo passazhirskogo transporta [Organization of road traffic taking into account route passenger transport]. *Ekonomika Severo-Zapada: Problemy i perspektivy razvitiya* [Economy of the North-West: Problems and Prospects of Development] (66–77). Saint Petersburg: IPERAN. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Kapskiy, D.V., Ivanov, V.P., Vigerina, T.V., Kot, Ye.N., Kuz'menko, V.N., Mozalevskiy, D.V., ... Kuznetsova, A.A. (2021). *Marshrutnyy transport gorodov Polotska i Novopolotska: effektivnost' i tendentsii razvitiya* [Route transport of the cities of Polotsk and Novopolotsk: efficiency and development trends]. Novopolotsk: Polotsk State University. (In Russ.).
7. Kapskiy, D.V., Golovnich, A.K., Vigerina, T.V., Kuz'menko, V.N., Krasil'nikova, A.S., Gorelik, Ye.N., ... Kot, Ye.N. (2020). Razvitiye gorodskogo transporta v gorodakh Polotske i Novopolotske [Development of urban transport in the cities of Polotsk and Novopolotsk]. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta* [Herald of Polotsk State University], 11, 85–97. (In Russ., abstr. in Engl.).

8. Kapskiy, D.V., Ivanov, V.P., Golovnich, A.K., Kuz'menko, V.N., Krasil'nikova, A.S., Gorelik, Ye.N., ... Kot, Ye.N. (2020). Otsenka sostoyaniya transportnoy sistemy gorodov Polotska i Novopolotska [Assessment of the state of the transport system of the cities of Polotsk and Novopolotsk]. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta* [Herald of Polotsk State University], 11, 98–102. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 07.02.2022

**REDUCTION OF UNPRODUCTIVE COSTS OF ROUTE PASSENGER TRANSPORT
BY THE SECTORAL METHOD**

S. SEMTCHENKOV, D. KAPSKY

This article discusses the issues of reducing unproductive costs of route passenger transport in order to increase efficiency by improving the process of organizing passenger transportation, vehicle operation, taking into account the characteristics of various modes of transport. Methods, techniques and algorithms designed for the implementation of individual proposals are considered.

Keywords: route passenger transport, unproductive costs, operational work, route vehicles, sectoral method, increase in work efficiency.

УДК 62-405.8

ВЛИЯНИЕ КОМПОНЕНТОВ ПОКРЫТИЯ НА ПРОЦЕСС ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРОПОР С ТРЕЩИНАМИ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

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

При определенных условиях трещины в металле способны залечиваться (уменьшать свой объем), что приводит к улучшению эксплуатационных характеристик материала. Рассматривается возможный результат залечивания трещин при восстановлении работоспособного состояния деталей машин в рамках модели структурно-диффузионного механизма. При диффузии по границам зерен энергия активации диффузии хрома меньше, чем по вакансиям; скорость залечивания трещин главным образом определяется значением и изменением энергии активации диффузии атомов Cr. Увеличению скорости залечивания трещин способствует увеличение температуры отжига.

Ключевые слова: микротрещины, восстановление, структурно- диффузионный механизм, покрытия, хром, термообработка.

Введение. Дефекты в твердых телах, в частности в металлах, могут быть различного типа и происхождения. Дефектная структура твердых тел формируется уже на этапе получения самого материала. В процессе изготовления из него изделий и при эксплуатации готовых изделий она может существенно трансформироваться. При этом может изменяться количество самих дефектов и происходить их переформирование с образованием новых типов нарушений. Указанная трансформация дефектов оказывает существенное влияние на прочность сцепления покрытия с основным металлом при восстановлении–упрочнении работоспособного состояния деталей узлов трения. Наибольшее применение нашли самофлюсующиеся сплавы системы Ni(Co)–Cr–D–Si. Покрытия имеют слоистую структуру, и свойства покрытий отличаются от свойств компактных материалов. Для таких покрытий характерны: пониженная прочность сцепления на границах между частицами и слоями, обусловленная неполным схватыванием, а также повышенным содержанием оксидов, нитридов, пор и различных включений в пограничных областях; пористость, возникающая в результате газовой выделения и кристаллизации частиц с высокими скоростями, а также выплеска материала покрытия при ударе частиц о подложку [1]. Наибольшей пористостью характеризуются поверхностные слои покрытия и слои, прилегающие к подложке. Покрытия имеют различную твердость и микротвердость по поверхности и глубине, неоднородный химический состав, большое количество составляющих микроструктуры. В отдельных частицах и во всем покрытии формируются значительные внутренние напряжения, приводящие к образованию микротрещин.

Основная часть. Детали машин и элементы конструкций обычно содержат как врожденные дефекты и трещины, так и возникшие при обработке, изготовлении и транспортировке; все они подчиняются некоторой закономерности распределения по количеству и размерам. Это распределение в совокупности с локальным напряженным состоянием и средой определяют потенциальные центры возникновения трещины. Чаще всего трещина берет начало от какого-нибудь небольшого поверхностного дефекта детали по истечении инкубационного периода конечной продолжительности. Затем трещина растет под совместным влиянием приложенной нагрузки и окружающей среды. После того как трещина достигла критической глубины, происходит быстрое разрушение.

Отказ материала с покрытием в значительной степени определяется наличием дефектов в металле и материале покрытия, а также их взаимодействие с частицами присадочного материала (рисунок 1).

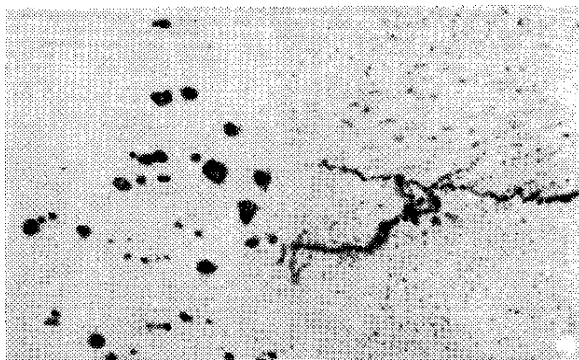


Рисунок 1. – Начало межкристаллитной микротрещины в металле покрытия на границе зерна
(увеличение 100:1)

Прочность сцепления газотермических покрытий с поверхностью определяется совместным влиянием структурных дефектов границы раздела и остаточными напряжениями в ее плоскости. Структурные дефекты возникают из-за неполного контакта деформированных напыленных частиц с напыляемой поверхностью и неполного развития физико-химических связей между контактирующими поверхностями. Остаточные напряжения обусловлены в основном различными теплофизическими и физико-механическими свойствами материалов покрытия и основы, а также разной их зависимостью от температуры.

В материаловедении металлов состояние поверхности и зарождение трещин во многом определяет сопротивление материалов деформации и разрушению. При определенных условиях трещины в металле способны залечиваться (уменьшать свой объем), что приводит к улучшению эксплуатационных характеристик материала.

Структурно-диффузионный механизм взаимодействия пор с трещинами. Трещины являются стоками для точечных дефектов и микропор в твердом теле. Процесс залечивания (разрастания) связан с потоком микропор (вакансий) от трещины (к трещине). Известно, что концентрация вакансий у поверхности малых трещин (пор) выше, чем у больших, и следовательно, появляется поток вакансий от малых трещин к большим. Происходит залечивание малых трещин. Поток микропор на поверхность единицы длины трещины f рассчитывается по формуле [2; 3]

$$f = \frac{\gamma n_1}{R} \sqrt{\frac{D}{n_2}} \frac{K_1(z)}{K_0(z)}, \quad (1)$$

где $\gamma = \frac{2\alpha\Omega}{kT}$; $z = R\sqrt{\frac{n_2}{D}}$;

R – радиус трещины;

D – эффективный коэффициент диффузии для дефектов данного типа;

n_1, n_2 – константы;

α – удельная поверхностная энергия;

Ω – характерный объем одной микропоры (дефекта);

T – абсолютная температура;

$K_i(z)$ – цилиндрические функции Макдональда i -го порядка.

Учтем, что температурная зависимость коэффициента диффузии дефектов может быть описана известным соотношением

$$D = D_0 e^{-\frac{E_a}{kT}}, \quad (2)$$

где E_a – энергия активации диффузии дефекта;

D_0 – постоянная величина;

k – постоянная Больцмана.

Таким образом, поток микропор оказывается сложной функцией многих параметров: температуры, коэффициента диффузии, поверхностной энергии, радиуса трещины.

Рассмотрим диффузию микропор в объеме, прилегающем к открытой трещине цилиндрической формы. Тогда изменение объема трещины ΔV длиной h за время t рассчитаем как

$$\Delta V = 2\pi R h f t \Omega. \quad (3)$$

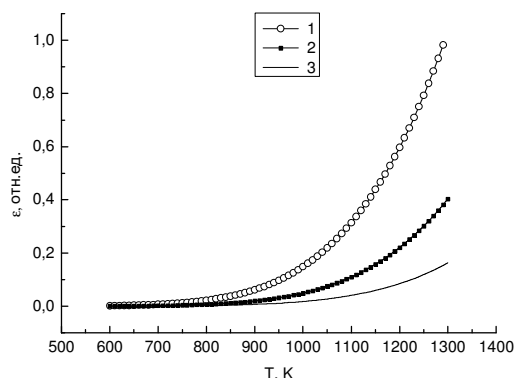
При оценке процесса залечивания трещины необходимо определить относительное изменение объема трещины (относительную скорость залечивания трещины) $\epsilon = \Delta V/V$.

На рисунке 2 представлены зависимости относительного изменения объема трещины от температуры для различных значений энергии активации диффузии микропор. Известно [4], что в металлах энергия активации для вакансий лежит в интервале 0,9–2,0 эВ.

Как видно из рисунка 2, изменение энергии активации пор в небольшом интервале 1–1,25 эВ существенным образом влияет на параметр залечивания. Кроме этого, скорость процесса залечивания зависит от температуры. С ростом температуры резко возрастает отличие в скорости залечивания в исследуемом интервале энергий.

Предполагается, что поток примесных атомов в процессе залечивания должен быть на порядок меньше вакансионного механизма, поскольку энергия миграции для примесей E_a лежит в широких пределах от 1 до 5 эВ. Таким образом, основное влияние пор на залечивание трещин связано с низким значением энергии активации диффузии пор.

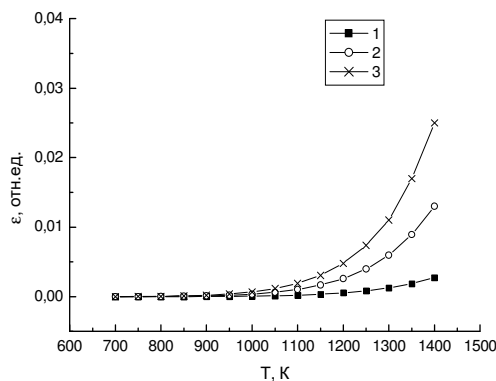
Рассмотрим диффузию атомов Сг в объеме, прилегающем к открытой цилиндрической трещине. Изменение объема трещины ΔV длиной h за время t определим по формуле (3).



1 – 1; 2 – 1,13; 3 – 1,25 ($D_0 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $t = 20 \text{ ч}$)

Рисунок 2. – Зависимость относительного изменения объема трещины от температуры при различных энергиях активации пор, эВ

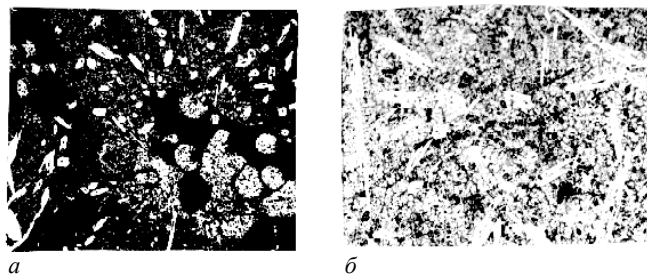
На рисунке 3 представлены результаты моделирования зависимости относительного изменения объема трещины при диффузии атомов хрома. Для хрома в α -Fe энергия активации лежит в пределах от 2,17 до 2,4 эВ, а частотный фактор – от 0,89 до 0,78 $\text{см}^2/\text{с}$. При переходе от диффузии по вакансиям (кривая 1) к диффузии по границам зерен металла (кривые 2, 3), где структура, как правило, чрезвычайно сильно искажена, процесс диффузии значительно ускоряется. Это связано с тем фактом, что при диффузии по границам зерен энергия активации диффузии хрома меньше, чем по вакансиям [5].



1 – 2,4; 2 – 2,2; 3 – 2,0 ($D_0 = 0,85 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, время отжига $t = 20 \text{ ч}$)

Рисунок 3. – Зависимость относительного изменения объема трещины от температуры отжига при различных энергиях активации диффузии хрома, эВ

Результаты стереометрического анализа показали, что размер, количество и распределение микропор в покрытии существенно изменяются в зависимости от режима термообработки. Покрытия, наплавленные при температуре 1000–1050 °С и малых выдержках, имеют пористость до 10%. Поры мелкие, не более 0,2 мм, равномерно распределены по толщине слоя покрытия. При температурах 1050 °С и выше формируется практически беспористое покрытие (рисунок 4).



а – $T = 1150 \text{ °C}$, $\tau = 5 \text{ мин}$; б – $T = 1150 \text{ °C}$, $\tau = 20 \text{ мин}$

Рисунок 4. – Изменение плотности и структуры покрытия при нагреве (х60)

Закключение. Металлические покрытия представляют собой сложные многокомпонентные неравновесные системы, обладающие избыточной свободной энергией, обусловленной наличием в слоях большого количества микро- и макродефектов структуры в частицах присадочного материала. Сопротивление восстановленных деталей машин с покрытиями усталостному разрушению в значительной степени зависит от состава, структуры и свойств материала подложки и покрытия, а также технологии того или иного метода получения защитного покрытия, характера и параметров нагружения. Предварительные результаты исследования говорят о том, что скорость заживления трещин главным образом определяется значением и изменением энергии активации диффузии атомов Cr. При кратковременной температурной обработке температура от максимума на поверхности уменьшается вглубь материала. На поверхности поры температура различна, и атомы, «испаряясь» с «горячей» поверхности, конденсируются на «холодной». В итоге пора перемещается как единое целое. Учитывая, что коэффициент поверхностной диффузии больше чем объемной, вклад в изменение размера поры диффузии по границам зерен может быть существенным. Кроме того, разность температур создает давление, сжимающее пору в направлении градиента температуры.

В результате учета перечисленных факторов можно ожидать, что при кратковременной высокотемпературной обработке в приповерхностной области металла малые поры заживаются полностью; поры, лежащие близко к поверхности, выходят на поверхность, создавая беспористую «корку», что приводит к дополнительному упрочнению материала. Можно предположить, что увеличению скорости заживления трещин способствует последующая термообработка покрытия, позволяющая повысить их прочность за счет уменьшения общей пористости и размеров поровых каналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоцерковский, М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий / М.А. Белоцерковский. – Минск : Технопринт, 2004. – 200 с.
2. Завистовский, В.Э. Механика разрушения и прочность материалов с покрытиями / В.Э. Завистовский. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 1999. – 144 с.
3. Zavistovskiy, V. On interaction between cracks and particles in coated materials / V. Zavistovskiy, E. Bogdanova, S. Zavistovskiy // Fracture mechanics and physics of construction materials and structures : Materials of II International symposium, Lviv-Dubliany, 7–10 Nov. 1996. – P. 45–48.
4. Фистуль, В.И. Физика и химия твердого тела / В.И. Фистуль. – М. : Металлургия, 1995. – 486 с.
5. Завистовский, В.Э. Влияние хрома на процесс взаимодействия пор с трещинами [Электронный ресурс] / В.Э. Завистовский, А.С. Вабищевич // Инновационные технологии в машиностроении : электрон. сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 19–20 апр. 2018 г. – Новополоцк : ПГУ, 2018. – С. 66–69. – URL: <https://elib.psu.by/handle/123456789/22014>.

REFERENCES

1. Belocerkovskij, M.A. (2004). *Tekhnologii aktivirovannogo gazoplamnennogo napyleniya antifrikcionnyh pokrytij* [Technologies of activated flame spraying of antifriction coatings]. Minsk : Tekhnoprint. (In Russ.).
2. Zavistovskiy, V.E. (1999). *Mekhanika razrusheniya i prochnost' materialov s pokrytiami* [Fracture mechanics and strength of materials with coatings]. Novopolotsk: Polotskiy State University. (In Russ.).
3. Zavistovskiy, V., Bogdanova, E., & Zavistovskiy, S. On interaction between cracks and particles in coated materials. [Fracture mechanics and physics of construction materials and structures] (45–48).
4. Fistul', V.I. *Fizika i khimiya tverdogo tela* [Physics and chemistry of solid state]. Moscow : Metallurgiya. (In Russ.).
5. Zavistovskiy, V.E., & Vabishchevich, A.S. (2018). Vliyaniye khroma na protsess vzaimodeystviya por s treshchinami [Influence of chromium on the process of interaction of pores with cracks]. *Innovatsionnyye tekhnologii v mashinostroyenii* [Innovative technologies in mechanical engineering]. Novopolotsk : PGU. (In Russ., abstr. in Engl.). URL: <https://elib.psu.by/handle/123456789/22014>

Поступила 05.11.2021

THE INFLUENCE OF COATING COMPONENTS ON THE PROCESS OF INTERACTION OF MICROPORES WITH CRACKS DURING THE RESTORATION OF MACHINE PARTS

V. ZAVISTOVSKY, S. ZAVISTOVSKY

Under certain conditions, cracks in the metal can heal (reduce their volume), which leads to an improvement in the performance characteristics of the material. The possible result of the healing of cracks during the restoration of the functional state of machine parts within the framework of the model of the structural-diffusion mechanism is considered. When diffusing along grain boundaries, the activation energy of chromium diffusion is less than for vacancies; the rate of crack healing is mainly determined by the value and change in the activation energy of diffusion of Cr atoms. An increase in the annealing temperature contributes to an increase in the crack healing rate.

Keywords: microcracks, restoration, structural diffusion mechanism, coatings, chrome, heat treatment.

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 620.193.92:622.692.4

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ОБРАЗОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ
КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ
НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ**

*д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ, А.С. БОНДАРЕВ, канд. техн. наук, доц. А.Г. КУЛЬБЕЙ
(Полоцкий государственный университет)*

Рассмотрен фактор трубных свойств и способа изготовления. Проведен анализ механических испытаний отобранных образцов дефектных участков, а также анализ результатов лабораторных исследований. Выявлена связь между собой ряда факторов, которые вкуче сопутствуют образованию и дальнейшему развитию дефектов типа коррозионного растрескивания под напряжением (далее – КРН).

Ключевые слова: КРН, низколегированная сталь, термическая обработка, механические испытания, предел текучести, механические свойства, металлографический контроль, испытания.

Введение. Газотранспортная система (ГТС) обеспечивает бесперебойное газоснабжение потребителей Республики Беларусь и является надежным партнером в международной системе транспортировки газа. В 2020 г. после расшифровки данных внутритрубной диагностики (далее – ВТД) впервые были выявлены дефекты типа «зона продольных трещин» на магистральных газопроводах газотранспортной системы Республики Беларусь. В дальнейшем обследование газопроводов при шурфовке и изучение образцов, вырезанных из дефектного металла трубы, подтвердило стресс-коррозионную природу происхождения дефектов.

Одной из нерешенных проблем в транспорте газа является недостаточная изученность явления коррозионного растрескивания под напряжением. Несмотря на большое количество исследований, вопрос обеспечения надежности магистральных газопроводов исследован недостаточно, а факторы, влияющие на образование данного вида дефекта, не рассмотрены детально.

Основная часть. Цель данной статьи – обзор фактора трубных свойств и способа изготовления, для чего был проведен анализ механических испытаний отобранных образцов дефектных участков, а также анализ результатов лабораторных исследований. Была выявлена связь между собой ряда факторов, которые вкуче сопутствуют образованию и дальнейшему развитию дефектов типа коррозионного растрескивания под напряжением (далее – КРН).

Рассмотрены II и III нитки, лежащие в одном техническом коридоре, магистрального газопровода «Торжок–Минск–Ивацевичи» (далее – МГ «ТМИ») 425–527 км диаметром 1220 мм, на которых были найдены зоны продольных трещин. Стоит отметить, что срок эксплуатации двух ниток МГ превышает полный амортизационный срок эксплуатации (33 года).

Всего на II и III нитках МГ «ТМИ» по результатам ВТД было выявлено 30 (15 труб) и 110 (71 труба) зон продольных трещин соответственно.

1. Паспортные данные объектов.

Участок 425,88–528,48 км МГ «ТМИ» II введен в эксплуатацию в 1978 г. Срок эксплуатации – 42 года. МГ «ТМИ» II расположен в одном техническом коридоре с I и III нитками МГ «ТМИ», которые соединены между собой системой переключек.

Участок 425,96–527,93 км МГ «ТМИ» III введен в эксплуатацию в 1982 г. Срок эксплуатации – 38 лет. МГ «ТМИ» III расположен в одном техническом коридоре с I и II нитками МГ «ТМИ».

2. Влияние фактора трубных свойств и способа изготовления.

Участок МГ «ТМИ» II состоит из стальных электросварных двухшовных труб D_n 1220x12,0 мм (участки III, IV категорий), а также электросварных двухшовных труб D_n 1220x15,2 мм (участки I и II категорий) класса прочности K52.

Более 99% труб, использованных при строительстве участков МГ «ТМИ» II, изготовлены в 1976–1977 гг. на Челябинском трубопрокатном заводе по ТУ 14-3-109-73 из низколегированной стали марки 17Г1С по ТУ 14-1-446-72 (толщина стенки 12,0 мм и 15,2 мм), а также в феврале–июле 1976 г. на Харцызском трубопрокатном заводе (толщина стенки 12,0 мм). После изготовления электросварные двухшовные трубы термической обработке не подвергались.

Участок МГ «ТМИ» III состоит из стальных электросварных спиральношовных и двухшовных труб с наружным диаметром 1220 мм с толщиной стенки 10,5 мм и 12 мм соответственно (участки III, IV категорий), а также электросварных двухшовных труб с наружным диаметром 1220 мм с толщинами стенок 14,5 и 15,2 мм (участки I и II категорий).

Основной объем использованных при строительстве труб на участке МГ «ТМИ» III изготовлен по ТУ 14-3-721-78 на Волжском трубном заводе из стали марки 17Г1С (класс прочности К60) в 1980 г. (электросварные спиральношовные трубы D_n 1220x10,5 мм). Трубы D_n 1220x12,0 мм изготовлены по ТУ 14-3-602-77 на Челябинском трубопрокатном заводе из стали марки 17Г1С-У (класс прочности К52) в 1980–1981 гг.

После изготовления трубы термической обработке не подвергались за исключением электросварных спиральношовных труб D_n 1220x10,5 мм, которые были подвергнуты термическому упрочнению (ускоренное охлаждение от температуры аустенизации с последующим высоким отпуском) для обеспечения соответствия характеристик механических свойств металла классу прочности К60.

Из приведенных данных следует, что повышенное число стресс-коррозионных дефектов в 200-миллиметровой зоне от продольного шва на двухшовных трубах связано с особенностями технологии их производства.

При формовке заготовок для труб и подгибке кромок в непрерывных вальковых станах на трубных заводах возникает предрасположенность к растрескиванию труб в околшовной зоне в виде продольно ориентированных рисков, царапин, зон растрескивания и аномальных пластических деформаций, а также зон напряжений у мест загиба.

При формовке лист протягивается роликами, поэтому для обеспечения сцепления с ними лист формируется сухим и предварительно не очищается. Посторонние мелкие частицы (песок и др.), попадающие между листом и роликами, вызывают большое число поверхностных продольно-ориентированных механических дефектов. После сварки продольных швов трубы термически не обрабатываются, что приводит к остаточным напряжениям в зоне термического влияния.

Спиральношовные трубы изготавливаются из рулонной стали при сворачивании ее в формовочное устройство. После сварки шва трубы проходят термообработку от остаточных напряжений, возникающих из-за формовки и сварки спирального шва.

Вывод по трубным свойствам и способа изготовления:

- повышенное число стресс-коррозионных дефектов в 200-миллиметровой зоне от продольного шва на двухшовных трубах связано с особенностями технологии их производства;
- недостаточно термической обработки, выполняемой для спиральношовных труб, чтобы убрать все концентраторы напряжений, возникающих при изготовлении труб, поэтому в условиях, благоприятных для развития КРН, происходит развитие зон продольных трещин именно в опорной части спиральношовных труб;
- на спиральношовных трубах зоны трещин заявлялись в 4 раза чаще, чем на двухшовных;
- анализ результатов обследования дефектных труб позволяет утверждать, что концентраторы напряжений и другие аномалии, инициирующие рост стресс-коррозионных трещин, возникают в трубах на стадии их производства.

3. Отбор образцов и механические испытания.

На сегодняшний день все исследуемые участки МГ, на которых обнаружены дефекты – зоны продольных трещин, эксплуатируются более 38 лет.

Значительный срок эксплуатации в сочетании с рядом факторов (накопление дефектов в результате воздействия напряжений, коррозионной среды, водорода, износа изоляционных покрытий, ремонтных работ, электрохимического процесса и пр.) отражается на характеристиках трубной стали и предполагает некоторую деградацию металла и возможное снижение прочностных характеристик трубных плетей. Концентраторы напряжений на поверхности трубы (царапины, задиры и др.), которые были не очень опасны после строительства, могут стать критическими после длительной эксплуатации. По сравнению с другими показателями (предел текучести, временное сопротивление), по мнению большинства исследователей, наиболее заметные изменения происходят с ударной вязкостью, характеризующей хрупкое разрушение. Также отмечается, что стандартные механические свойства металла труб МГ после длительной эксплуатации практически не отличаются от нормативных значений, несмотря на деструктивные процессы, происходящие в структуре материала трубы.

На основании обобщения накопленных знаний о трещиноподобных дефектах в рамках реализации мероприятий по снижению аварий МГ по причине КРН ПАО «Газпром» определен перечень труб, склонных к коррозионному растрескиванию под напряжением.

Основная масса труб, используемых при строительстве на анализируемых участках МГ «ТМИ» II, МГ «ТМИ» III (более 50%) в соответствии с перечнем, приведенным в СТО Газпром 2-2.3-760-2013¹, являются склонными к КРН. Спиральношовные трубы по ТУ 14-3-721-78 марки стали 17Г1С (Волжский трубный завод) участка 425,96–527,93 км «ТМИ» III, хоть и отсутствуют в перечне, не единожды упоминались в исследованиях в связи с аварийным разрушением труб вследствие КРН. Перечень труб¹, склонных к КРН и эксплуатируемых на исследуемых участках, приведен в таблице 1.

¹ Инструкция по идентификации коррозионного растрескивания под напряжением металла труб как причины отказов магистральных газопроводов : стандарт организации : СТО Газпром 2-2.3-760-2013 / Разработан науч.-исследоват. ин-том природ. газов и газовых технологий. – М. : ОАО «Газпром», 2015. – IV. – 36 с.

Таблица 1. – Трубы, предрасположенные к коррозионному растрескиванию под напряжением

ТУ на трубу	Диаметр, мм	Класс прочности (марка стали)
ТУ 14-3-109-73	1220	17Г1С, 17Г1С, 17Г2СФ, 14Г2САФ
ТУ 14-3-602-77	1220	17Г1С-У

С учетом результатов последней ВТД, итогов локального обследования и ремонтов дефектов были проведены лабораторные исследования металла труб и сварных соединений темплетов, вырезанных на участке 425,88–528,48 км МГ «ТМИ» II в Оршанском и Крупском УМГ с подтвержденными трещиноподобными дефектами. При исследовании образцов выполнены лабораторные испытания на растяжение в соответствии с ГОСТ 6996-66² и на ударный изгиб в соответствии с ГОСТ 9454-78³. При испытании на ударный изгиб использованы образцы с концентраторами вида U (КСУ-40) и V (КСУ0).

По результатам испытаний определены фактические механические свойства металла труб 1220х12,0 мм и сварных соединений (предел прочности, предел текучести и ударная вязкость) из стали марки 17Г1С производства Челябинского и Харцызского трубопрокатных заводов. Сравнение полученных результатов с нормируемыми величинами⁴ позволяет сделать вывод о несоответствии отдельных показателей. Результаты испытаний, нормируемые значения, минимальные и максимальные значения механических свойств по результатам испытаний, выполненных в 2020 г., приведены в таблицах 2–4.

Таблица 2. – Результаты испытаний на ударную вязкость на участке 425,88–528,48 км МГ ТМИ II

Толщина стенки, мм	Образцы	Ударная вязкость, Дж/см ²			
		Значение КСУ ⁻⁴⁰ по сертификату	Значение КСУ ⁻⁴⁰ КСВ ⁻⁰ по СНиП	Диапазон значений КСУ ⁻⁴⁰ по испытаниям	Диапазон значений КСВ ⁰ по испытаниям
12 (Оршанское УМГ)	бездефектная зона ОМ	45	Не менее 39,2	52,9–90,2	33,9–73,5
	зона КРН	–	–	16,6–90,7	17,3–68
12 (Крупское УМГ)	бездефектная зона ОМ	45	Не менее 39,2	51,7–93,2	30,4–73,1
	зона КРН	–	–	28,2–58,4	47,8–76,1

Таблица 3. – Результаты испытаний на предел прочности на участке 425,88–528,48 км МГ ТМИ II

Толщина стенки, мм	Образцы	Предел прочности, МПа			
		Минимальное значение по сертификату	Нормируемое значение по ТУ 14-3-109-73	Минимальное значение по испытаниям	Максимальное значение по испытаниям
12 (Оршанское УМГ)	бездефектная зона	540	510	530,7	635
	зона КРН			411,2	640,1
12 (Крупское УМГ)	бездефектная зона ОМ	530	510	543	652
	зона КРН	–	–	502,1	631

Таблица 4. – Результаты испытаний на предел текучести на участке 425,88–528,48 км МГ ТМИ II

Толщина стенки, мм	Образцы	Предел текучести, МПа			
		Минимальное значение по сертификату	Нормируемое значение по ТУ 14-3-109-73	Минимальное значение по испытаниям	Максимальное значение по испытаниям
12 (Оршанское УМГ)	бездефектная зона	540	353	312	455
	зона КРН			314,2	552,4
12 (Крупское УМГ)	бездефектная зона ОМ	360	353	290,7	468,6
	зона КРН	–	–	293,5	502,2

² Сварные соединения. Методы определения механических свойств [Электронный ресурс] : ГОСТ 6996-66. – Введ. 01.01.1967. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003544>

³ Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах [Электронный ресурс] : ГОСТ 9454-78. – Введ. 01.01.1979. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005045>

⁴ Магистральные трубопроводы [Электронный ресурс] : СНиП 2.05.06-85. – Введ. 01.04.1987. URL: <https://www.belorusneft.by/sitebeloil/.content/docs/snip-2.05.06-85-magistralnye-truboprovody.pdf>

Ударная вязкость испытанных образцов основного металла КСВ-40 с концентраторами вида U (бездефектные зоны) соответствует нормируемому значению. Изменений в сторону ухудшения данного свойства не зафиксировано. Несмотря на значительный разброс значений, наблюдается снижение ударной вязкости при испытании металла труб на образцах с острым надрезом КСВ0, характеризующее увеличение хрупкости и снижение пластичности.

Так, на 8 трубах из 15 в Оршанском УМГ и на 2 трубах из 8 Крупского УМГ участка 425,88–528,48 км МГ «ТМИ» II (основной металл бездефектных зон) КСВ0 зафиксирован ниже минимально допустимого нормативного значения. Для 4 труб результаты испытаний с показателем ниже нормируемого подтверждены дважды (определены на двух образцах из трех), т.е. у 10 труб из 23 испытанных на ударную вязкость на одном образце из 3 выявлены несоответствия (у 4 труб из 23 результаты несоответствия подтверждены дважды). Нельзя исключать, что некоторые трубы изначально имели более низкие значения ударной вязкости основного металла КСВ0, при этом соответствовали требованиям ТУ (не ниже 29,4 Дж/см²), но не соответствовали требованиям СНиП 2.05.06 (не ниже 39,2), что подтверждают испытания, проводившиеся ранее (МГ «ТМИ» II, 2010 г.: КСВ0 35,7 ± 4,4).

Изменение характеристики КСВ0 может влиять на процесс возникновения и развития дефектов КРН, хотя и не будет являться основным признаком склонности сталей к преждевременному хрупкому разрушению при длительном воздействии статических напряжений. Испытания на ударную вязкость не дают однозначную оценку склонности металла к замедленному разрушению, каковым в общем случае является КРН.

Исходя из проведенных испытаний, можно сделать вывод, что предел прочности практически не изменился и в бездефектной зоне превышает минимально допустимое значение (металл труб соответствует нормативным значениям и имеет запас прочности). На 14 трубах (61% из использованных для вырезки темплетов) выявлено снижение предела текучести основного металла (до 290,7 МПа): на 6 трубах из 15 (9 образцов из 45) участка в Оршанском УМГ и на всех 8 трубах (15 образцов из 30) в Крупском УМГ, вырезанных в бездефектных зонах. Для 3 труб (20%) участка Оршанского УМГ и 4 труб (50%) участка Крупского УМГ результаты испытаний с показателем ниже нормируемого подтверждены дважды (определены на двух образцах из трех), при этом одна труба с подтвержденными дважды результатами располагалась в зоне упругопластического изгиба.

В зоне упругопластических изгибов на металл труб воздействуют дополнительные напряжения растяжения и сжатия. Снижение предела текучести в этих зонах обусловлено как изменением механических свойств по причине длительного срока эксплуатации, так и дополнительными напряжениями, приводящими к пластической (в отличие от упругой) деформации. При прочих равных условиях это увеличивает возможность зарождения и развития КРН.

Вывод по механическим испытаниям:

– большой разброс значений предела текучести (от 314 до 552 МПа) в зоне КРН скорее свидетельствует о неоднородности и неравномерности процессов изменения механических свойств металла в зоне роста колоний трещин и изменений, происходящих в микроструктуре стали;

– механические свойства по результатам испытаний, диапазон значений:

- бездефектных зон:
предел текучести основной металл $\sigma_{0,2}$, МПа: 290,7–468;
предел прочности (временного сопротивления) σ_b , МПа: 530,7–652;
ударная вязкость основной металл КСВ (-40 °C), Дж/см²: 47,8–93,2;
ударная вязкость основной металл КСВ (0 °C), Дж/см²: 30,4–73,5;
- зон с КРН:
предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа: 314 - 552;
предел прочности (временного сопротивления), σ_b , МПа: 411–640;
ударная вязкость основной металл КСВ (-40 °C), Дж/см²: 16,6–94,7;
ударная вязкость основной металл КСВ (0 °C), Дж/см²: 17,3–68.

4. Результаты лабораторных исследований.

Были выполнены лабораторные исследования темплетов с дефектами «зона продольных трещин».

Для лабораторных исследований были использованы темплеты, вырезанные из труб 4-х участков с выявленными дефектами зоны продольных трещин (7 фрагментов труб с трещинами КРН на наружной поверхности).

В процессе исследования:

- определен химический состав металла труб;
- выполнен металлографический контроль труб;
- проведены испытания на одноосное статическое растяжение поперечных образцов основного металла трубы;
- проведены испытания на ударный изгиб на образцах Шарпи (ISO-V).

Отмечено, что все обследованные аномалии вида «зона продольных трещин» представляют собой колонии многочисленных трещин, состоящие из совокупности параллельно расположенных отдельных трещин, имеющих общую продольную ориентацию относительно оси трубы. Траектория отдельных трещин внутри колонии имеет извилистый и/или ступенчатый вид. В обследованных зонах в основном отсутствуют значимые коррозионные повреждения металла (общая и неравномерная коррозия, каверны, язвы).

Преимущественная ориентация трещин совпадает с направлением, перпендикулярным действующим растягивающим напряжениям от внутреннего давления при эксплуатации трубы. Траектория трещин имеет извилистый характер, по ходу продвижения трещин наблюдаются разветвления. Между берегами трещин присутствуют продукты коррозии.

Микроисследования показали, что трещины, зародившись на наружной поверхности трубы, продвигаются вглубь ее стенки по извилистой траектории с многочисленными разветвлениями, что говорит о межзеренном характере распространения трещин. Берега трещин с раскрытием более 10 мкм заполнены полностью либо частично продуктами коррозии. Трещины носят ступенчатый характер. Вторичные микротрещины, зародившиеся во внутренних объемах стенки трубы независимо от магистральной трещины, представляют собой микро-расслоения, возникающие на границе раздела матрица–сульфидное включение.

На основании проведенных макро- и микроисследований делается вывод, что растрескивание основного металла носит коррозионно-механический характер, в частности, протекает по механизму КРН. Образование трещин КРН вызвано длительным взаимодействием факторов специфической внешней среды (околотрубного электролита) в зонах повреждения изоляции и напряженного состояния металла трубы, вызванного кольцевыми напряжениями от внутреннего давления продукта, а также структурой и свойствами металла трубы. На рисунках 1, 2 представлены трещины в поперечном сечении на критической и начальной стадиях развития КРН.

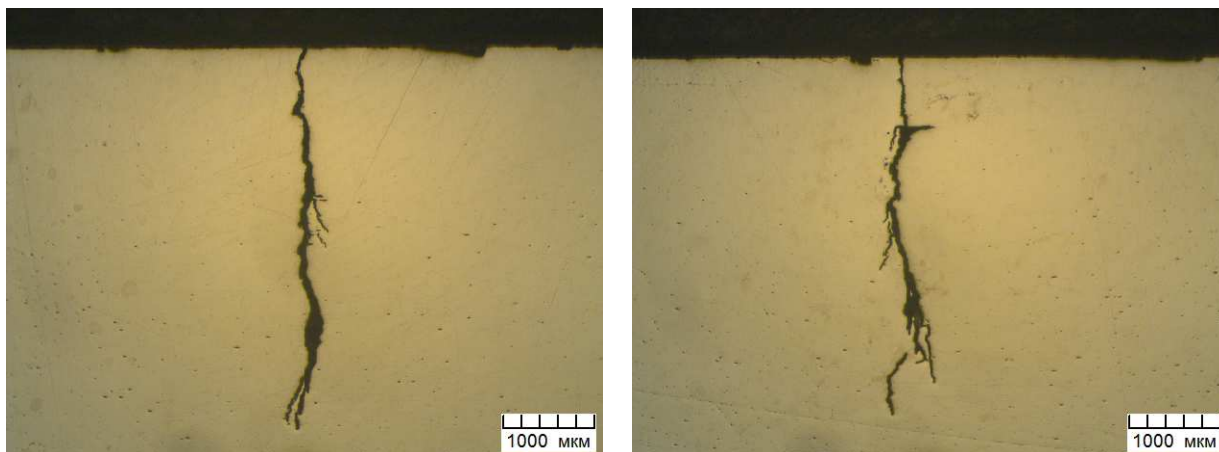


Рисунок 1. – Трещины КРН в поперечном сечении основного металла трубы (критическая стадия)



Рисунок 2. – Трещины КРН в поперечном сечении основного металла трубы (начальная стадия)

Для одного фрагмента трубы исследован излом образца стали (рисунок 3), проведен рентгеноструктурный анализ окисленного слоя. В зоне почернения (поверхность трещины КРН) при увеличении 100 крат был обнаружен окисленный слой красного цвета. Светлая зона представляет собой чистый излом основного металла без окисления.

По результатам расшифровки рентгенограммы окисленный слой на поверхности трещины КРН определен как красная ржавчина состава Fe_2O_3 .

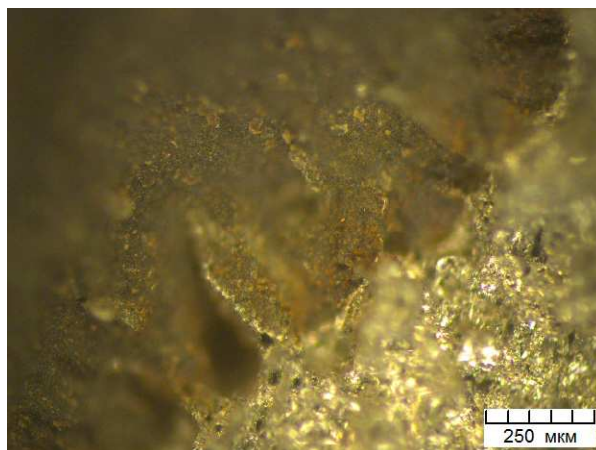


Рисунок 3. – Поверхность излома в зоне почернения

Испытанием на одноосное статическое растяжение поперечных образцов основного металла труб определены базовые характеристики механических свойств, параметров кривой упрочнения и предельных состояний исследуемого металла образцов, изготовленных из основного металла (ОМ) двухшовных труб 1220х12,0 мм марки стали 17ГС, 17Г1С-У по ТУ 14-3-109-73, ТУ 14-3-602-77.

Средние значения прочностных характеристик основного металла труб по результатам испытаний на растяжение поперечных образцов представлены в таблице 5.

Таблица 5. – Средние значения прочностных характеристик основного металла труб по результатам испытаний на растяжение поперечных образцов

Характеристика	«ТМИ» П (425,88–528,48 км)			«ТМИ» П (529,99–649,76 км)
Номер образца	1	2	3	4
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	496	496	422	438
Предел прочности σ_b , МПа	640	645	547	620
Относительное удлинение $\delta_5\%$	21	23,1	26,9	25,6
Отношение $\sigma_{0,2} / \sigma_b$	0,78	0,77	0,77	0,71
Напряжение разрушения σ_k , МПа	1239	1294	1032	985
Удельная работа равномерной деформации W_m , МДж/м ³	82	96	104	111
Удельная работа разрушения образца W_p , МДж/м ³	845	872	716	469

Испытанием на ударный изгиб на образцах Шарпи (ISO-V) основного металла труб определены минимальная ударная вязкость KCV при температуре испытаний 0 °С и доля вязкой составляющей в изломе образца. Средние значения характеристик основного металла труб по результатам испытаний на ударный изгиб представлены в таблице 6.

Таблица 6. – Средние значения характеристик основного металла труб по результатам испытаний на ударный изгиб

Характеристика	«ТМИ» П (425,88–528,48 км)			«ТМИ» П (529,99–649,76 км)
Номер образца	1	2	3	4
Минимальная ударная вязкость KCV, Дж/см ²	33,1	25,7	46,6	39,2
Доля вязкой составляющей в изломе, %	0	0	20-25	100

Сравнение полученных данных с нормативными документами позволяет заключить, что фактические прочностные и пластические характеристики основного металла труб полностью соответствуют нормируемым требованиям.

Ударная вязкость и трещиностойкость основного металла 5 образцов находятся на низком удовлетворительном уровне, 1 – на неудовлетворительном.

Вывод по лабораторным исследованиям:

- в соответствии с результатами анализ выполненных обследований дефектов и лабораторных исследований труб показал полное соответствие выявленных зон продольных трещин дефектам КРН. Выявленные дефекты классифицируются как начальная, средняя и критическая стадия развития трещин КРН (глубина проникновения трещин КРН составляет от 0,5 мм до 4,25 мм);

- анализ выполненных обследований дефектов и лабораторных исследований труб на МГ «ТМИ» II км 425,88–528,48 показал полное соответствие выявленных зон продольных трещин дефектам КРН. Выявленные дефекты классифицируются как средняя и критическая стадия развития трещин КРН (глубина трещин КРН составляет от 0,6 мм до 1,8 мм);

- анализ выполненных обследований дефектов и лабораторных исследований труб на МГ «ТМИ» III км 425,90–529,00 показал полное соответствие выявленных зон продольных трещин дефектам КРН. Выявленные дефекты классифицируются как начальная, средняя и критическая стадия развития трещин КРН (глубина трещин КРН составляет до 0,5 мм на спиральношовных трубах до 3,5 мм на двухшовных).

Таким образом, для определения участков с возможными дефектами стресс-коррозионного происхождения, не выявленных ВТД, необходимо учитывать следующие факторы:

- пленочное защитное покрытие трассового нанесения;
- наличие многочисленных дефектов защитного покрытия в виде гофр и складок (фактор фактически невозможно использовать при определении участков ввиду отсутствия достоверных данных);

- наличие многочисленных коррозионных язв, расположенных в опорной части трубы на расстоянии 100–300 мм от кольцевых швов и вытянутых вдоль продольного шва (для спиральношовных труб – только в опорной части) и зафиксированных на нескольких трубах подряд по результатам ранее выполненной ВТД;

- минимальная толщина стенки трубы на участке;

- наличие временных водотоков, отчетливо выраженных в рельефе местности;

- наличие глинистых периодически увлажняемых грунтов согласно данным исполнительной документации;

- общая зарегулированность дождевого и речного стока – наличие мелиоративных каналов по трассе МГ (количество КРН уменьшается).

Заключение. Анализ результатов диагностических обследований, шурфовок и ремонтов участков МГ с дефектами «зона продольных трещин» показал, что КРН подвержены трубы:

- с минимальной толщиной стенки (10,5 мм; 12 мм) из уложенных на участках труб;

- спиральношовные Волжского трубного завода, двухшовные производства Харцызского и Челябинского трубопрокатных заводов;

- марки стали 17Г1С, 17Г1С-У;

- со сроком эксплуатации 38 и более лет;

- с пленочной изоляцией трассового нанесения;

- с неудовлетворительным состоянием изоляции (как правило, с наличием подпленочного электролита ввиду большого количества гофр и складок);

- заложенные в суглинистых и глинистых почвах либо песчаных/супесчаных, подстилаемых тяжелыми водонепроницаемыми глинистыми грунтами в местах сезонного и постоянного переувлажнения.

По результатам проведенных механических испытаний отмечены незначительные изменения в свойствах стали труб анализируемых участков: снижение предела текучести и ударной вязкости.

В соответствии с результатами лабораторных исследований установлено полное соответствие выявленных зон продольных трещин дефектам КРН; фактические прочностные и пластические характеристики основного металла труб соответствуют нормируемым требованиям. Ударная вязкость и трещиностойкость основного металла находятся на низком удовлетворительном и неудовлетворительном уровне.

Практически 100% дефектов расположено в угловой ориентации от 4 до 8 часов, для двухшовных труб – в зоне продольного сварного шва в опорной части.

Влияние циклических нагрузок за период 2016–2020 гг. (максимальных перепадов давления и температур, характерных для участков, расположенных по ходу газа за выходными шлейфами КС) не подтверждается. Основная масса труб с подтвержденными дефектами располагалась на расстоянии > 20 км от выходного шлейфа и далее по ходу газа. На участке МГ «ТМИ» III наблюдается аналогичная ситуация – за выходным шлейфом КЦ-3 дефектов КРН в 15-километровой зоне не выявлено.

Однозначно выделить доминирующий фактор для возникновения и развития КРН не представляется возможным, т.к. факторы оказывают взаимосвязанное и комплексное воздействие.

Поступила 27.10.2021

**INVESTIGATION OF FACTORS THAT INFLUENCE THE FORMATION AND DEVELOPMENT
OF STRESS CORROSION CRACKING
IN GAS PIPELINES**

V. IVANOV, A. BONDAREV, A. KULBEI

The article considers factor pipe properties and manufacturing method, an analysis of mechanical tests of selected samples of defective areas was carried out, as well as an analysis of the results of laboratory studies. A number of factors have been identified, which together accompany the formation and further development of defects such as stress corrosion cracking (hereinafter referred to as CRN).

Keywords: *KRN, low-alloy steel, heat treatment mechanical tests, yield strength, mechanical properties, metallographic control, testing.*

УДК 665.777.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕФТЯНОГО КОКСА

канд. техн. наук, доц. **Е.В. САФРОНОВА**, канд. техн. наук, доц. **А.В. СПИРИДОНОВ**
(Полоцкий государственный университет)

Приводится описание основных характеристик и область применения нефтяного кокса. Целью работы является исследование физико-механических свойств нефтяного кокса. Проведены экспериментальные исследования основных механических характеристик нефтяного кокса: прочности, дробимости, истираемости и ударной вязкости. Были проведены опыты дробления кокса в щековой дробилке и измельчения в барабанной мельнице, изучение гранулометрического состава путем просеивания на лабораторных ситах и взвешивания на аналитических весах. Рассмотрены основные области применения нефтяного кокса.

Ключевые слова: нефтяной кокс, прокалка, летучие вещества, замедленное коксование, прочность, ударная вязкость, дробление, истираемость.

Введение. Углубление переработки нефти и газа приводит к необходимости строительства на нефтеперерабатывающих заводах новых технологических установок. Одним из таких объектов на ОАО «Нафтан» является строящаяся установка замедленного коксования. Наряду с перспективами производства нефтяного кокса появляется проблема поиска рациональных способов его применения. В данном случае объектом исследования является кокс нефтяной.

Кокс (нефтяной) представляет собой твердый с порами нефтепродукт черно-серого цвета, получаемый при замедленном коксовании нефтяных остатков. Элементный состав сырого (непрокаленного) кокса нефтяного составляет примерно (в %): 91–99,5 – углерод, остальное примеси, включающие водород (0,035–4%), серу (0,5–8%), азот, кислород и металлы. Основные показатели качества: максимальное содержание серы, золы, влаги (< 3% масс.), выход летучих веществ (при нагревании), гранулометрический состав (при просеивании), механическая прочность (при нагружении).

Коксы нефтяные подразделяют [1]:

- по содержанию *S*: на малосернистые (<1%), сернистые (до 2%), высокосернистые (> 2%);
- по содержанию золы: на малозольные (<0,5%), среднезольные (0,5–0,8%), высокзольные (> 0,8%);
- по гранулометрическому составу: на кусковой (с размером частиц > 25 мм), «орешек» (6–25 мм), мелочь (< 6 мм).

Основная часть. *Получение нефтяного кокса.* Нефтяной кокс получают в процессе коксования при температуре 450–520 °С. Исходным сырьем являются нефтяные остатки: гудроны, полугудроны, крекинг-остатки, тяжелые газойли каталитического крекинга, смолы пиролиза, остатки масляного производства (асфальты, экстракты).

Основной источник коксообразования – смолисто-асфальтеновые вещества в сырье. В зависимости от исходного сырья и промышленного способа коксования получают коксы различного качества, различающиеся содержанием серы, золы и упорядоченностью структуры. Наиболее дорогой – кокс высокоупорядоченной анизотропной (игольчатой) структуры, используемый для производства специальных электродов. Для получения игольчатого кокса используют специально подготовленное сырье – дистилятные крекинг-остатки.

В зависимости от сырья и технологии изготовления получают следующие марки малосернистого нефтяного кокса (таблицы 1, 2) [1].

Таблица 1. – Технология изготовления и область применения¹ [1]

Марка кокса	Технология изготовления	Область применения
КНПС-СМ	Коксование в кубах смолы пиролиза	Производство углеродных материалов специального назначения
КНПС-КМ	Коксование в кубах смолы пиролиза	Производство углеродных конструкционных материалов
КНГ	Коксование в кубах прямогонных, крекинговых и пиролизных остатков	Производство графитов
КЗГ	Замедленное коксование (кокс с размером кусков свыше 8 до 250 мм)	Производство графитов
КЗА	Замедленное коксование (кокс с размером кусков свыше 8 до 250 мм)	Производство алюминия в электропечах
КНА	Коксование в кубах прямогонных и крекинговых остатков	Производство алюминия в электропечах
КЗО	Замедленное коксование (коксовая мелочь с размером кусков до 8 мм)	Производство абразивных материалов и др.

¹ Коксы нефтяные малосернистые : ГОСТ 22898-78. – Введ. 1979-01-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200008698>

Таблица 2. – Характеристика нефтяных коксов¹

Показатели	КНПС-СМ	КНПС-СМ	КНГ	КЗГ	КЗА (в. сорт)	КЗА (1 сорт)	КНА	КЗО
Массовая доля мелочи, %, не более								
Куски размером менее 25 мм	4,0	4,0	–	–	–	–	–	–
Куски размером менее 8 мм	–	–	10	10	8	10	10	–
Истираемость, %, не более	9,0	11,0	–	–	–	–	–	–
Плотность, г/см ³	2,04	2,08	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	–

Характеристики нефтяного кокса. Нефтяной кокс обладает сочетанием физико-химических и физико-механических свойств, благодаря которым он получил широкое применение во многих отраслях промышленности. К таким свойствам относятся:

- стойкость в агрессивных средах;
- малый коэффициент линейного расширения;
- высокая прочность;
- высокая теплоэлектропроводность;
- хорошие механические характеристики и др.

Для приобретения этих свойств кокс должен пройти термическую обработку при температурах не ниже 650–750 °С, а некоторые свойства достигаются только после графитирования кокса при температурах 2600–3000 °С. Цветная и черная металлургия в своих производствах применяют прокаленный кокс. При прокаливании удаляются летучие вещества и частично гетероатомы (например, сера и ванадий), снижается удельное электрическое сопротивление. При графитировании двухмерные кристаллы превращаются в кристаллические образования трехмерной упорядоченности.

В общем виде стадии облагораживания можно представить следующей схемой [1]:

- кристаллы → карбонизация (прокаливание при 500–1000 °С) →
 → двухмерное упорядочение структуры (1000–1400 °С) →
 → предкристаллизация (трансформация кристаллов при 1400 °С и выше) →
 → кристаллизация, или графитирование (2200–2800 °С).

Кокс, получаемый на установках замедленного коксования, применяют в производстве графитовых материалов. Потребность промышленности в таких материалах, способных работать при высоких температурах (1500–2000 °С) и в агрессивных средах и при этом не терять своих свойств, возрастает. Определенные марки кокса используют при производстве особо ответственных изделий: ядерных графитов, аэрокосмических компонентов и т.п.

Кокс, получаемый на установках замедленного коксования, может быть и хорошим топливом, но сжигание коксовой мелочи в обычных промышленных топках – нерациональный способ ее использования. Тем более, это несет экологический вред. Так, в г. Новополоцке планировалось строительство твердотопливного парового котла для сжигания нефтяного кокса, но в дальнейшем по этим причинам отказались [2].

Метод измерения прочности нефтяного кокса². Прочность кокса имеет большое значение при определении пригодности кокса для различных целей. Поэтому показатель прочности кокса относится к числу наиболее важных показателей его качества. В связи с тем что кокс представляет собой пористое тело, а его куски имеют определенное количество трещин, то следует различать прочность материала кокса с трещинами и без трещин.

Прочность пористого тела кокса, т.е. кусочков кокса, лишенных трещин, называют структурной. Она может быть определена по методу Грязнова: пробу кокса крупностью зерен 3–6 мм помещают вместе с остальными шарами в металлический цилиндр. Цилиндр приводят во вращение с частотой 25 об/мин. После 40 мин взвешивают остаток кокса на сите с отверстиями 1 мм. Для хорошего кокса прочность пористого тела составляет не менее 75%.

Прочность пористого тела кокса рассчитывается по формуле³

$$i = \frac{m_1}{m_0} \cdot 100\%,$$

² Определение реакционной способности кокса и прочности кокса после реакции : ГОСТ Р 54250-2010. – Введ. 2012-07-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200085589>

³ Кокс каменноугольный. Метод определения прочности : ГОСТ 8929-75. – Введ. 1977-01-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200021161>

где m_1 – остаток кокса на сите, г;
 m_0 – исходная навеска кокса, г.

Измельчение на барабанной мельнице и определение прочности. Для проведения опыта⁴ были подобраны куски нефтяного кокса диаметром более 60 мм. Затем взвешены и загружены в барабанную мельницу (рисунки 1) с восемью цилиндрическими мелющими телами. Установленная скорость вращения – 50 об/мин.



Рисунок 1. – Лабораторная барабанная мельница с цилиндрическими мелющими телами

Прокрутив кокс 4 мин, извлекаем его из аппарата и просеиваем на ситах диаметром 40 и 10 мм соответственно. Полученные куски были взвешены на аналитических весах AS 220/C/2 с погрешностью до 0,0015 г. Данные представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Массы кокса после измельчения

Номер опыта	m , г	m_1 , г	m_2 , г
1	52,6306	52,2517	0,0575
2	52,2517	49,1962	0,8350
3	57,6815	55,2673	0,3705

На основании данных ситового анализа пробы кокса после испытания в барабане вычисляется показатель выхода класса более 40 мм (M_{40}), характеризующий дробимость кокса, и показатель выхода класса менее 10 мм (M_{10}), характеризующий истираемость кокса, в процентах по следующим формулам:

$$M_{40} = \frac{m_1 \cdot 100}{m}, \quad M_{10} = \frac{m_2 \cdot 100}{m},$$

где m – масса пробы, загруженной в барабан, кг;
 m_1 – масса кокса, оставшегося на сите с отверстиями диаметром 40 мм, кг;
 m_2 – масса кокса, прошедшего через сито с отверстиями диаметром 10 мм, кг.
 Полученные данные сводятся в таблицу 4.

Таблица 4. – Показатели выхода кокса

Номер опыта	M_{40} , %	M_{10} , %
1	99,28	0,11
2	94,15	1,60
3	95,81	0,64

Согласно полученным результатам, кокс очень хорошо истирается, имеет хорошую прочность, но плохо дробится.

Далее было решено подобрать дробильное оборудование, которое подойдет для данного типа кокса. В результате исследования были приняты следующие типы дробилок:

⁴ Кокс каменноугольный. Метод определения прочности : ГОСТ 8929-75. – Введ. 1977-01-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200021161>

- щековые дробилки с рифленной рабочей поверхностью щек [3];
- валковые дробилки с рифлеными валками.

Данные типы дробилок обладают хорошей способностью к дроблению прочных материалов. Их рабочая поверхность имеет рифленость, поэтому кокс будет менее подвержен истираемости, но при этом хорошо подвергаться дроблению.

Определение дробимости на щековой дробилке. Было решено продробить небольшой кусок нефтяного кокса, чтобы убедиться в полученных из опыта с барабанной мельницей свойствах. Оборудование: щековая дробилка с рифленной щекой. Зазор между щеками выбран в 3 мм. Дробление куска диаметром 55 мм произошло в течение 5 с. Полученный результат представлен на рисунке 2.



Рисунок 2. – Измельченный кокс в выгрузном бункере щековой дробилки

Подбор дробильного оборудования для среднечного и хрупкого материала: для хрупких материалов наилучшим способом измельчения является раскалывание и излом. Была сделана попытка распилить кусок нефтяного кокса. В связи с тем что нефтяной кокс пилится ножовкой очень плохо, было проведено одно измерение ударной вязкости.

Определение ударной вязкости. Испытание производится на машинах, называемых маятниковыми копрами. Образец размером 55x10x10 мм с U-образным надрезом (образец Шарпи)⁵ свободно положен на опоры копра, где концентратор симметричен относительно опор. Был произведен удар маятника, работа удара оказалась мала, следовательно, ударная вязкость данного материала небольшая. Случившийся хрупкий излом (рисунок 3) при незначительной работе удара показал, что нефтяной кокс – очень хрупкий материал.



Рисунок 3. – Фотография разрушенного образца

Заключение. В ходе исследований были определены основные механические характеристики нефтяного кокса: прочность, дробимость, истираемость и ударная вязкость. Показано, что нефтяной кокс, полученный методом замедленного коксования, можно перерабатывать в дробилках и мельницах. Согласно результатам исследования, кокс очень хорошо истирается, имеет хорошую прочность, но плохо дробится. Кроме того, нефтяной кокс – прочный и хрупкий материал.

Потребность в углеродных материалах в промышленности, способных работать при высоких температурах и в агрессивных средах без потери своих свойств, возрастает при производстве особо ответствен-

⁵ Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах : ГОСТ 9454-78. – Введ. 1979-01-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005045>

ных деталей. Полученные результаты можно применить для последующей обработки нефтяного кокса со строящейся установки ОАО «Нафтан» замедленного коксования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глаголева, О.Ф. Кокс нефтяной / О.Ф. Глаголева // Мир нефтепродуктов. – 2009. – № 3. – С. 38–41.
2. Шакенев, Р.К.-К. Применение нефтяного кокса в зависимости от его свойств / Р.К.-К. Шакенев, А.Ж. Касенов // Путь науки. – 2016. – № 1. – С. 11–13.
3. Сиденко, П.М. Измельчение в химической промышленности / П.М. Сиденко. – 2-е изд., перераб. – М. : Химия, 1977. – 375 с.
4. Борщев, В.Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы : учеб. пособие / В.Я. Борщев. – Тамбов : Тамб. гос. техн. ун-т, 2004. – 75 с.

REFERENCES

1. Glagoleva, O.F. (2009). Koks neftyanoy [Petroleum coke]. *Mir nefteproduktov* [World of oil products], 3, 38–41. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Shakenov, R.K.-K. & Kasenov, A.zh. (2016). Primeneniye neftyanogo koksa v zavisimosti ot yego svoystv [The use of petroleum coke depending on its properties]. *Put' nauki* [The path of science], 1, 11–13. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Sidenko, P.M. (1977). *Izmel'cheniye v khimicheskoy promyshlennosti* [Grinding in the chemical industry]. Moscow: Khimiya. (In Russ.).
4. Borshchev, V.Ya. (2004). *Oborudovaniye dlya izmel'cheniya materialov: drobilki i mel'nitsy* [Equipment for grinding materials: crushers and mills]. Tambov: Tambov State Technical University. (In Russ.).

Поступила 14.09.2021

STUDY OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF PETROLEUM COKE

Ye. SAFRONOVA, A. SPIRIDONOV

The article describes the main characteristics and scope of petroleum coke. The aim of this work is to study the physical and mechanical properties of petroleum coke. Experimental studies of the main mechanical characteristics of petroleum coke have been carried out: strength, crushing ability, abrasion and impact strength. Experiments were carried out for crushing coke in a jaw crusher and grinding in a drum mill, studying the particle size distribution by sieving on laboratory sieves and weighing on an analytical balance. The main areas of application of petroleum coke are considered.

Keywords: petroleum coke, calcination, volatiles, delayed coking, strength, impact strength, crushing, abrasion.

УДК 622.691.4

РЕКОНСТРУКЦИЯ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ПЕРЕТОЧНОГО ГАЗА ОСИПОВИЧСКОГО ПХГ

канд. тех. наук, доц. Л.М. СПИРИДЕНКО, Н.А. БОГДАНОВИЧ, А.Р. ЗАХАРОВ
(Полоцкий государственный университет)

Рассматривается одна из основных проблем, стоящих перед газовой промышленностью и определяющих перспективы ее дальнейшего развития, а именно снижение расхода энергоресурсов на нужды отрасли. Оценивается экологическое воздействие на окружающую среду выброса природного газа, что увеличивает в атмосфере концентрацию метана. Анализируются причины и виды пластовых потерь, возможные способы утилизации газа на подземных хранилищах, схематизирована общая утилизация природного газа. Авторами анализируются способы снижения потерь природного газа в атмосферу, а также модернизация технологической схемы и установки узла редуцирования природного газа. Проведены расчеты объема газа на стравливание. Согласно расчетам, возможно сокращение потерь природного газа на 99% (51 823 м³), общее годовое количество газа на технологические потери – на 68%.

Ключевые слова: перетоки газа, пластовые потери, ловушка, замок, подземное хранение газа, сборные пункты, стравливание, фильтр-сепаратор.

Введение. Одной из основных проблем газовой промышленностью, определяющих перспективы ее дальнейшего развития, можно назвать снижение расхода энергоресурсов на нужды отрасли. Сейчас, когда отрасль добывает немногим более 700 млрд м³ газа в год, ежегодно расходуется на собственные нужды около 40–50 млрд м³, эта проблема особенно актуальна.

Существует и экологическое воздействие на окружающую среду, связанное с увеличением в атмосфере концентрации метана. В последние годы усилилось общественное внимание к сохранению озонового слоя и глобальному потеплению климата. В ряду парниковых газов метан занимает второе место после углекислого газа по степени опасности для окружающей среды.

Для Республики Беларусь как транзитной страны по доставке природного газа в Европу вопросы энергосбережения и энергоэффективности являются приоритетным направлением деятельности общества «ОАО Газпром трансгаз Беларусь» и представляют собой комплекс программных мер, направленных на создание необходимых условий организационного, материального, финансового характера для рационального использования и экономного расходования топливно-энергетических ресурсов.

ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» применяет новейшие технологии и самые современные методы производств, обеспечивает экологическую безопасность объектов и снижает экологические риски¹, осуществляя:

- разработку и внедрение эффективных ресурсосберегающих и энергосберегающих технологий, направленных на охрану окружающей среды;
- оценку воздействия на окружающую среду и уровней возможных изменений;
- комплексное восстановление нарушенных природных систем на территориях строительства и эксплуатации объектов;
- своевременное проведение технической диагностики, профилактических и ремонтных работ;
- совершенствование системы производственного экологического контроля.

Белорусской дочерней компанией реализован ряд природосберегающих проектов. Подтверждая свой статус экологически ответственного предприятия, помимо работы, направленной на соблюдение природоохранных требований национального законодательства, ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» берет на себя и дополнительные добровольные обязательства по охране окружающей среды. Основным направлением этой работы является уменьшение производственных потерь природного газа.

Основная часть. *Источник потерь природного газа на Осиповичском ПХГ.* Основной источник потерь природного газа на Осиповичском ПХГ – перетоки газа. Перетоки газа на стадии эксплуатации ПХГ относятся к пластовым потерям газа и связаны с его миграцией из объекта хранения за замок ловушки или контрольные горизонты при нарушении герметичности «покрышки» объекта хранения. Пластовые потери обусловлены тем, что современный уровень разведки структур для хранения газа не позволяет однозначно определить герметичность «покрышки» объекта хранения.

¹ Экологическая политика ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» [Электронный ресурс] : Протокол дирекции ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» от 31.03.2014, № 11. URL: <http://www.btg.by/d/textpage/14/20/ehkologicheskaya-politika.pdf>

К пластовым потерям принято относить:

- газ, находящийся за пределами ловушки и изолированный от основной залежи ПХГ;
- газ, мигрирующий в вышележащие водоносные горизонты и не участвующий в технологии отбора газа и не оказывающий влияния на процесс эксплуатации хранилища.

Пластовые потери газа при эксплуатации ПХГ вызваны как геологическими, так и техническими причинами, проявляющимися самостоятельно или совместно.

Пластовые потери газа по геологическим причинам присущи хранилищам с водонапорным режимом, сооружаемым в сложных горно-геологических условиях. К геологическим причинам, вызывающим пластовые потери, относят наличие тектонических нарушений и литологических «окон» в основной крышке, непосредственно перекрывающей объект хранения газа [1].

Потери газа по техническим причинам имеют место на многих действующих ПХГ, сооружаемых как в водоносных пластах, так и в истощенных месторождениях. Частным случаем таких потерь являются перетоки газа в вышележащие горизонты и на поверхность, наблюдаемые по отдельным скважинам. Потери газа по техническим причинам, как показывает практика, носят локальный характер, контролируются различными промыслово-геофизическими методами.

При пластовых потерях газ может образовывать вторичные (техногенные) залежи в вышележащих контрольных горизонтах и за проектным контуром газоносности хранилища. К пластовым потерям следует относить такие техногенные залежи, из которых при существующей технике и технологии экономически нецелесообразно отбирать газ и принимать меры к недопущению его дальнейшего накопления.

Способы утилизации переточного газа. Утилизация переточного газа на объектах ПХГ предназначена для предотвращения скопления природного газа за пределами ловушки, в прилегающих горизонтах, и загрязнения окружающей среды. Технология утилизации переточного газа позволяет существенно снизить пластовые потери газа за счет его дальнейшего полезного использования.

Возможные варианты утилизации газа на ПХГ:

- эжектирование газа с использованием компрессоров;
- газификация близлежащих населенных пунктов;
- компримирование газа;
- использование низконапорного газа на собственные технологические нужды и в качестве топлива для генераторных установок по производству электроэнергии.

Эжектирование газа с использованием компрессоров теоретически возможно закачивать в трубопровод и в шлейф эксплуатационной скважины в дальнейшем использовать на собственные нужды.

Газификация близлежащих сел также связана с частичной утилизацией перетекающего газа. Однако ввиду сезонных колебаний потребления газа местными потребителями не удастся полностью утилизировать перетекающий газ, т.к. его объемы значительно больше.

Таким образом, наиболее целесообразной схемой утилизации на сегодня является использование низконапорного газа, отбираемого из техногенных залежей, путем применения компрессорной установки для подачи его в газопровод либо использование его на газогенераторных установках для выработки электроэнергии, что обеспечивает непрерывность процесса утилизации. Подобная технология утилизации позволяет обеспечить оптимальный режим работы разгружаемых скважин и круглогодичную утилизацию техногенного газа. Целесообразность этого варианта подтверждается схемами утилизации пластовых потерь газа на Осиповичском ПХГ².

Общая утилизация природного газа указана на рисунке 1.

Следующим видом потерь являются технологические потери при эксплуатации ПХГ. Анализ основных источников потерь газа при эксплуатации сборных пунктов газа показал, что все потери можно представить в табличной форме в виде работ, производимых при обслуживании и ремонте объектов ПХГ.

При нормальной эксплуатации сборных пунктов газа основные технологические потери газа за 1 год приведены в таблице 1.

Основным источником технологических потерь газа на сборных пунктах является стравливание из технологического оборудования и газопроводов (проведение капитальных ремонтов скважин, ремонтных работ на технологических нитках сборных пунктов газа, технического обследования и диагностирования газосепараторов).

Модернизация технологической схемы. Для снижения выбросов природного газа из газопроводов и оборудования в атмосферный воздух в первую очередь необходимо направить мероприятия на утилизацию или уменьшение технологических потерь при проведении ремонтных работ на технологическом оборудовании.

² Очистка и промывка технологического оборудования компрессорной станции и сборных пунктов Осиповичского ПХГ : СФШИ.40.101-2015. – 2015.

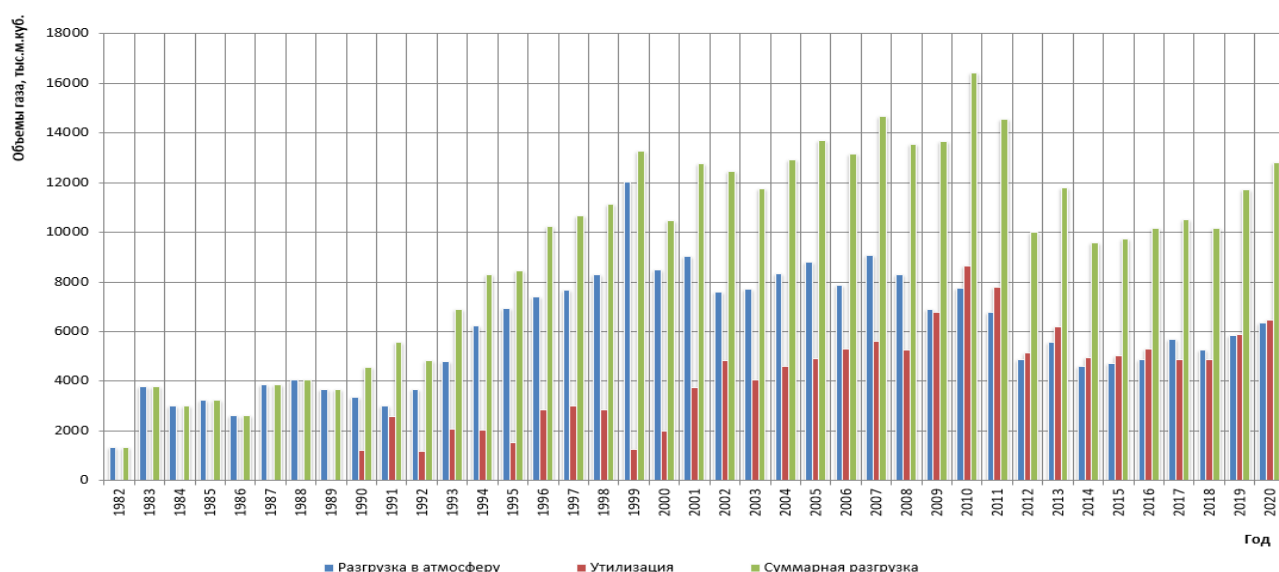


Рисунок 1. – Разгрузка контрольных горизонтов Осиповичского ПХГ

Таблица 1. – Основные технологические потери газа за 1 год

Статья затрат	Потери	
	м ³	%
1. Продувка технологического оборудования и газопроводов (продувка газосепараторов в период отбора газа с целью сброса пластовой воды в технологическую емкость)	22 700	30,1
2. Стравливание из технологического оборудования и газопроводов (проведение капитальных ремонтов скважин, ремонтных работ на технологических нитках сборных пунктов газа, технического обследования и диагностирования газосепараторов)	52 300	69,3
3. Перестановка запорной арматуры пневмоприводом	350	<1
4. Подрыв (проверка срабатывания) предохранительных клапанов	80	<1
Итого	75 430	

На Осиповичском ПХГ существует система утилизации природного газа, предусматривающая по окончании периода отбора газа, с целью промывки шлейфов, его выработку из эксплуатационных скважин³.

Однако при проведении ремонтных работ на оборудовании сборных пунктов газа, при которых необходимо высвобождение (стравливание) природного газа из полости трубопровода или оборудования, производить выработку через существующую систему утилизации газа невозможно технически. Невозможность проведения данных работ обусловлена тем, что установленный фильтр-сепаратор на узле редуцирования газа рассчитан на рабочее давление значительно меньше, чем эксплуатационное давление в технологических нитках сборных пунктов газа, а также технологическая нитка, по которой производится утилизация, может участвовать в закачке (отборе) газа.

В связи с этим предлагается произвести модернизацию технологической схемы и установить узел редуцирования природного газа (рисунок 2). Это позволит понизить давление вырабатываемого газа до допустимого давления на входе в фильтр-сепаратор (1,6 МПа).

Схема работает следующим образом: при стравливании шлейфа-газопровода (на примере технологической нитки № 1) необходимо закрыть шлейфовый кран № 1-6; открыть краны №№ 1-8, 1С и подать газ на предлагаемый узел редуцирования (на схеме изображен красным цветом). Регулятором давления понизить давление газа до 1,6 МПа и произвести подачу газа на фильтр-сепаратор ФС. После фильтра ФС второй ступенью редуцирования произвести понижение давления до 0,05 МПа с последующей подачей:

- на когенерационную установку;
- компрессорную установку БКУ «АРИЭЛЬ»;
- ГПУ-500.

³ Технологические системы в период закачки и отбора газа. Руководство по эксплуатации : СФШИ.40-01-2014. – ОАО «Газпром трансгаз Беларусь», 2014.

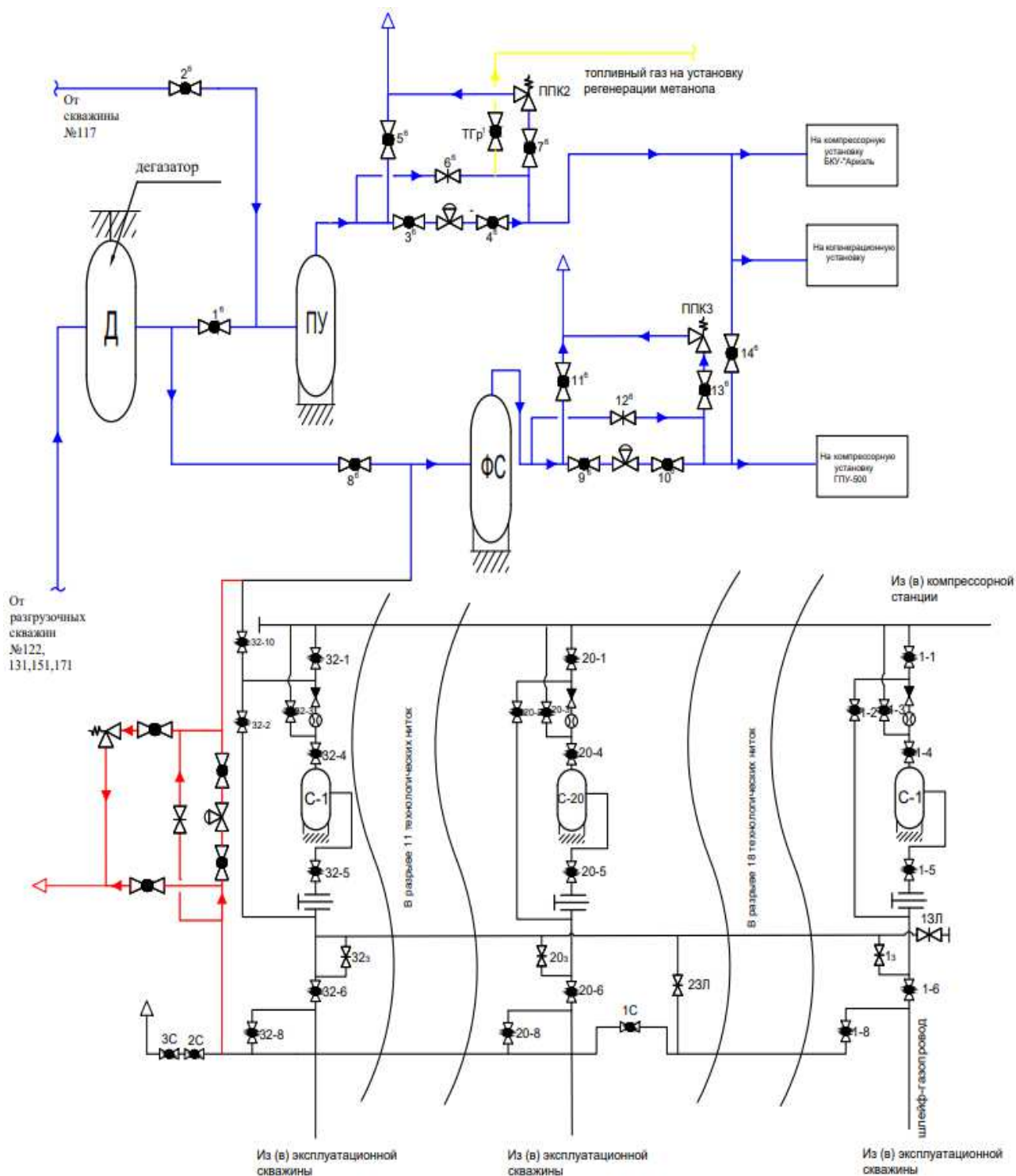


Рисунок 2. –Схема газопровода с установленным узлом редуцирования природного газа

При предлагаемой модернизации допустимо использовать и другой вариант работы технологической схемы. Она возможна при необходимости стравливания газа из технологического оборудования и трубопроводов до крана № 6^б. Для этого необходимо произвести подачу газа не через сечной кран № 8^б, а через существующую задавочную линию. Это позволит вырабатывать природный газ из необходимого участка без стравливания шлейфа-газопровода.

Схема работает следующим образом: при стравливании газосепаратора (на примере технологической нитки № 1) необходимо закрыть краны №№1-4, 1-6, открыть краны №№1-5, 13, 23Л и подать газ на предлагаемый узел редуцирования (на схеме изображен красным цветом). Регулятором давления понизить давление газа

до 1,6 МПа и произвести подачу газа на фильтр-сепаратор ФС. После фильтра ФС второй ступенью редуцирования произвести понижение давления до 0,05 МПа.

Выработку газа из сборных пунктов необходимо производить до избыточного давления 0,05 МПа (минимальное входное давление на когенерационной установке).

Расчет объема газа на стравливание. Произведем перерасчет объема газа на высвобождение (стравливание) из технологического оборудования и газопроводов на свечу при условии, что давление избыточного газа в оборудовании составит 0,05 МПа по формуле⁴

$$Q_{стр} = K_c \cdot V \cdot \left(\frac{P_n}{T_n \cdot z_n} - \frac{P_k}{T_k \cdot z_k} \right),$$

где K_c – коэффициент приведения объема газа к стандартным условиям (2893,17 К/МПа);

V – геометрический объем опорожняемого оборудования, м³;

P_n – абсолютное давление газа в оборудовании до стравливания, МПа;

P_k – абсолютное давление газа в оборудовании после стравливания, МПа;

T_n – температура газа до стравливания, К;

T_k – температура газа после стравливания, К;

z_n – коэффициент сжимаемости газа при P_n и T_n ;

z_k – коэффициент сжимаемости газа при P_k и T_k .

$$Q_{стр} = 2893,17 \cdot 1025 \cdot \left(\frac{0,13}{293 \cdot 0,9998} - \frac{0,1}{285 \cdot 0,9988} \right) = 477 \text{ м}^3.$$

Рассчитаем количество сокращенного газа при внедрении данного узла редуцирования при условии, что потери при стравливании из технологического оборудования и газопроводов равны $Q_{потерь} = 52 \text{ 300 м}^3$ (см. таблицу 1).

$$Q_{экон} = Q_{потерь} - Q_{стр} = 52 \text{ 300} - 477 = 51 \text{ 823 м}^3.$$

Как видно, статью затрат на стравливание из технологического оборудования и газопроводов (проведение капитальных ремонтов скважин, ремонтных работ на технологических нитках сборных пунктов газа, технического обследования и диагностирования газосепараторов) можно сократить на 99% (51 823 м³), а общее годовое количество газа на технологические потери – на 68%.

Заключение. Согласно проведенному анализу, были определены основные источники потери газа на ПХГ и факторы, влияющие на увеличение потерь газа.

Выявлены источники с наибольшими потерями газа. Так, наибольшие количественные потери газа происходят при ремонтных работах и составляют 45–50% от общих потерь.

Предложена модернизация технологической схемы выработки газа из шлейфов-газопроводов эксплуатационных скважин Осиповичского ПХГ по окончании периода отбора газа с целью промывки шлейфов. Практическое применение данной модернизации позволит значительно сократить потери товарного газа, уменьшить негативное воздействие на окружающую среду, сократить плату за эмиссию метана в атмосферу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайловский, А.А. Аналитический контроль объемов газа в пластах-коллекторах ПХГ / А.А. Михайловский. – М. : Газпром ВНИИГАЗ, 2013. – 250 с.

REFERENCES

1. Mikhaylovskiy, A.A. (2013). *Analitycheskiy kontrol' ob'yemov gaza v plastakh-kollektorakh PKHG* [Analytical control of gas volumes in UGS reservoirs]. Moscow: Gazprom VNIIGAZ. (In Russ.).

Поступила 27.08.2021

⁴ Методика расчета расхода природного газа на собственные технологические нужды и технологические потери газа при его транспортировке по газотранспортной системе ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» и магистральному газопроводу Ямал–Европа : СТП СФШИ.02.90-2017. – Минск : ОАО «Газпром», 2017.

**RECONSTRUCTION OF THE EXISTING CLEANING GAS UNIKIZATION SYSTEM
OF THE OSIPOVICHSKY UGS****L. SPIRIDENOK, N. BOGDANOVICH, A. ZAKHAROV**

The article discusses one of the main problems facing the gas industry and determining the prospects for its further development, namely, reducing energy consumption for the needs of the industry. It also considers the environmental impact on the environment through the release of natural gas, which in turn increases the concentration of methane in the atmosphere. The reasons and types of reservoir losses, possible ways of gas utilization in underground storage facilities were considered, general utilization of natural gas was schematized. The authors considered ways to reduce losses of natural gas into the atmosphere, and it was also proposed to modernize the technological scheme and install a natural gas reduction unit. Calculations were made of the volume of gas for bleeding. The result of the calculations was a reduction in natural gas losses by 99% (51823 m³), and the total annual amount of gas for technological losses by 68%.

Keywords: gas flows, formation losses, trap, lock, underground gas storage, collection points, bleeding, filter separator.

УДК 66.021.3

**ПОДОБИЕ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИКИ И МАССОПЕРЕДАЧИ
В РЕГУЛЯРНОЙ СТРУКТУРИРОВАННОЙ НАСАДКЕ**

д-р техн. наук, проф. П.Е. ВАЙТЕХОВИЧ, Д.Ю. МЫТЬКО
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0762-6204>

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9816-2539>

Определено перспективное направление в разработке и исследовании контактных устройств для массообменных аппаратов. Описаны преимущества разработанной регулярно-структурированной зигзагообразной насадки, а также отмечены устойчивые режимы работы в интервале скоростей газа. Исследовано влияние геометрических параметров насадки на ее гидравлические и массообменные характеристики. Эффективность массопередачи оценивалась по высоте единицы переноса на модельной системе при десорбции диоксида углерода из воды. Рассмотрена методика теории подобия для возможности масштабирования и использования полученных данных при расчете промышленных аппаратов. Приведены критерии, оказывающие наибольшее влияние на интенсивность массопередачи и гидродинамику. Представлены функциональные зависимости и показатели степеней критерияльных уравнений методом наименьших квадратов с использованием системы нормальных уравнений. Установлен диапазон погрешностей полученных данных.

Ключевые слова: массообменный аппарат, регулярно-структурированная насадка, гидродинамика, массопередача, теория подобия, критерияльные уравнения.

Введение. Одним из перспективных направлений в разработке и исследовании контактных устройств для массообменных аппаратов является использование структурированной насадки [1–3]. Среди конструктивных исполнений такой насадки выделим две основных разновидности: с криволинейными каналами для прохода газа и жидкости и прямолинейными. К конструкциям первого вида можно отнести насадки Mellapak, Zulzer, Flexipac, Intalox; второго – щелевые, решетчатые и сотовые блоки, плоскопараллельную, хордовую [1, 4]. Насадки второго вида в зависимости от способа изготовления могут иметь в поперечном сечении каналы различной формы: треугольные, прямоугольные, шестиугольные, трапециевидные. Их основное преимущество по сравнению с первым видом заключается в более простом изготовлении и сборке пакетов насадки. Они, например, представляют собой несколько коаксиально установленных цилиндров, соединенных между собой гофрированными листами с образованием вертикальных каналов треугольного сечения, что обеспечивает их повышенную жесткость¹. Внешний вид такой насадки показан на рисунке 1.

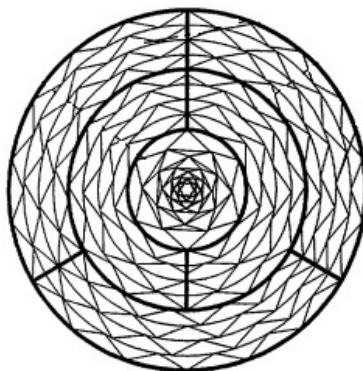


Рисунок 1. – Регулярная насадка для тепломассообменных аппаратов

Авторы данной работы провели сравнительные исследования подобной насадки¹ [5; 6], названной нами зигзагообразной, с известными и используемыми в производстве и установили ряд ее преимуществ. К ним относятся меньшее гидравлическое сопротивление, более высокая и стабильная во всем диапазоне эффективность массопередачи, устойчивый режим работы в интервале скоростей газа 0,7–2,6 м/с. Более того, пакет такой насадки можно изготовить на 3D-принтере.

¹ Регулярная насадка для тепло-массообменных аппаратов : пат. РФ 54818 / М.И. Фарахов, И.М. Шигапов, Н.Н. Маряхин, Т.М. Фарахов, Л.Е. Анатольевна. – Оpubл. 27.07.2006. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU54818U1_20060727

Основная часть. Дальнейшие исследования были направлены на установление влияния геометрических параметров указанной насадки, ее гидравлические и массообменные характеристики. Определяющим геометрическим параметром была принята длина стороны треугольного канала (12 мм; 17 мм; 22 мм). При этом условно зигзагообразная насадка такого вида именовалась как 3-12; 3-17; 3-22.

Исследования проводились в идентичных условиях на установке и по методике, описанной в работах² [5; 6]. Отличие заключалось в том, что в аппарате устанавливалось по три пакета соответствующей насадки высотой 100 мм. Во время эксперимента изменялась скорость газа в рабочем диапазоне, а плотность орошения оставалась неизменной $q = 0,043 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{с}$. Эффективность массопередачи оценивалась по высоте единицы переноса (ВЕП) на модельной системе при десорбции CO_2 из воды, когда основное сопротивление сосредоточено в жидкой фазе.

Результаты экспериментальных исследований показаны на рисунках 2, 3.

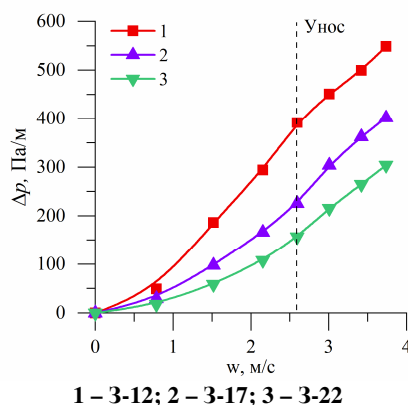


Рисунок 2. – Гидравлическое сопротивление пакета зигзагообразных насадок с орошением жидкостью

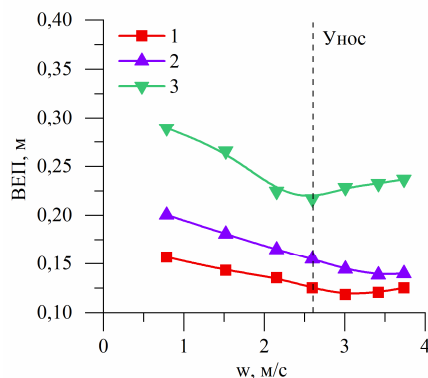


Рисунок 3. – Изменения ВЕП для насадок разной геометрии (обозначение на рисунке 2)

Видно, что с уменьшением размера канала повышается эффективность массопередачи (снижается ВЕП), но одновременно повышается и гидравлическое сопротивление насадки. Технико-экономическое сравнение показало², что треугольный канал с размером стороны 15–20 мм будет наиболее рациональным.

Для возможности масштабирования и использования полученных данных при расчете промышленных аппаратов воспользуемся методами теории подобия [7–9].

Известно, что на интенсивность массопередачи и гидродинамику наибольшее влияние оказывают критерии Рейнольдса для газа Re_y и жидкости Re_x , а также симплекс геометрического подобия Γ . Определяющим при этом являются диффузионный критерий Нуссельта для жидкости Nu'_x (основное сопротивление массопередачи в жидкой фазе) и гидродинамический критерий Эйлера Eu [7–9].

² Регулярная насадка для тепло-массообменных аппаратов : пат. РФ 54818 / М.И. Фарахов, И.М. Шигапов, Н.Н. Маряхин, Т.М. Фарахов, Л.Е. Анатольевна. – Оpubл. 27.07.2006. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU54818U1_20060727

Для выполнения поставленной задачи запишем функциональные зависимости определяемых критериев [7; 10]:

$$\text{Nu}'_x = f(\text{Re}_y, \text{Re}_x, \Gamma), \quad (1)$$

$$\text{Eu} = f(\text{Re}_y, \text{Re}_x, \Gamma) \quad (2)$$

Характерной особенностью зависимостей по эффективности массоотдачи и гидравлическому сопротивлению является их монотонное изменение во всем диапазоне скорости газа. Такие зависимости хорошо аппроксимируются степенными функциями [11–13]:

$$\text{Nu}'_x = Q \cdot \text{Re}_y^b \cdot \text{Re}_x^c \cdot \left(\frac{\delta_{np}}{H} \right)^d, \quad (3)$$

$$\text{Eu} = U \cdot \text{Re}_y^f \cdot \text{Re}_x^j \cdot \left(\frac{d_g}{H} \right)^l, \quad (4)$$

где Q, b, c, d, U, f, j, l – постоянные числа;
 δ_{np} – приведенная толщина пленки жидкости, м;
 H – высота регулярной структурированной насадки, м;
 d_g – эквивалентный диаметр насадки, м.

Для определения неизвестных коэффициентов в уравнениях (3) и (4) прологарифмируем степенную функцию. При ее графическом представлении в логарифмических координатах получается группа прямых линий. Ниже представлены уравнения, описывающие эти зависимости:

$$\ln \text{Nu}'_x = \ln Q + b \cdot \ln \text{Re}_y + c \cdot \ln \text{Re}_x + d \cdot \ln \left(\frac{\delta_{np}}{H} \right), \quad (5)$$

$$\ln \text{Eu} = \ln U + f \cdot \ln \text{Re}_y + j \cdot \ln \text{Re}_x + l \cdot \ln \left(\frac{d_g}{H} \right). \quad (6)$$

На основании экспериментальных данных рассчитаем критерии Nu'_x и Eu .

Критерий подобия Нуссельта определим по формуле [14; 15]:

$$\text{Nu}'_x = \frac{\beta_x \cdot \delta_{np}}{D_x}, \quad (7)$$

где β_x – коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, м/с;
 D_x – коэффициент диффузии жидкости, м²/с.
 Коэффициент массоотдачи жидкой фазы β_x , м/с, выразим из основного уравнения массопередачи [14; 15]:

$$\beta_x = \frac{M_x}{F \cdot \Delta \bar{X}_{cp}}, \quad (8)$$

где F – поверхность контакта фаз, м²;
 $\Delta \bar{X}_{cp}$ – средняя движущая сила;
 M_x – объем СО₂, переходящий из жидкости в газ, м³/с.
 Площадь поверхности контакта фаз F , м², определим по уравнению [7]:

$$F = H \cdot S_k \cdot a_v, \quad (9)$$

где S_k – площадь поперечного сечения колонны, м²;
 a_v – удельная поверхность насадки, м²/м³.
 Приведенную толщину стекающей пленки жидкости δ_{np} , м, определим по формуле [14; 15]:

$$\delta_{np} = \left[\frac{\mu_x^2}{\rho_x^2 \cdot g} \right]^{0.33}, \quad (10)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²;
 μ_x – динамическая вязкость жидкости, Па·с.

Коэффициент диффузии диоксида углерода в жидкости определим по уравнению [14; 15]:

$$D_x = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{A \cdot C \cdot \sqrt{\mu_x} \cdot (v_{\text{CO}_2}^{0,33} + v_{\text{H}_2\text{O}}^{0,33})^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_{\text{CO}_2}} + \frac{1}{M_{\text{H}_2\text{O}}}}, \quad (11)$$

где A и C – поправочные коэффициенты, зависящие от свойств растворенного вещества и растворителя; для газов $A = 1$, для воды $C = 4,7$;

v_{CO_2} , $v_{\text{H}_2\text{O}}$ – мольный объем диоксида углерода и воды, см³/моль;

M_{CO_2} , $M_{\text{H}_2\text{O}}$ – молярная масса диоксида углерода и воды, кг/моль.

Критерий гидродинамического подобия Эйлера Eu определяется по формуле [8]

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho_y \cdot w^2}, \quad (12)$$

где Δp – гидравлическое сопротивление пакета насадок, кг/м · с²;

w – скорость газового потока в каналах насадки, м/с.

Критерий Рейнольдса в уравнениях (3) и (4) для газа как сплошной фазы и жидкости, стекающей по стенкам канала в виде пленки, определяются по формуле [14; 15]:

$$Re_y = \frac{w_{cp} \cdot d_s}{\nu}, \quad (13)$$

где ν – кинематическая вязкость, м²/с;

w_{cp} – средняя скорость газа в колонне, м/с;

$$Re_x = \frac{4 \cdot L_x}{S_k \cdot a_v \cdot \mu_x}, \quad (14)$$

где L_x – расход жидкости, кг/с.

Геометрические симплексы уже представлены в упомянутых уравнениях (3) и (4) как соотношения размеров d_s/H и δ_{np}/H .

Далее на примере формулы (5) найдем коэффициенты и показатели степеней методом наименьших квадратов, воспользовавшись системой нормальных уравнений. Запишем ее в общем виде. Число опытов $N = 7$ [11–13].

$$\begin{cases} 7A + d \cdot \sum_{i=1}^N Re_y + e \cdot \sum_{i=1}^N Re_x + f \cdot \sum_{i=1}^N \delta_{np} / H = \sum_{i=1}^N Nu'_x, \\ A \cdot \sum_{i=1}^N Re_y + d \cdot \sum_{i=1}^N Re_y^2 + e \cdot \sum_{i=1}^N Re_y \cdot Re_x + f \cdot \sum_{i=1}^N Re_y \cdot \delta_{np} / H = \sum_{i=1}^N Nu'_x \cdot Re_x, \\ A \cdot \sum_{i=1}^N Re_x + d \cdot \sum_{i=1}^N Re_y \cdot Re_x + e \cdot \sum_{i=1}^N Re_x^2 + f \cdot \sum_{i=1}^N Re_x \cdot \delta_{np} / H = \sum_{i=1}^N Nu'_x \cdot Re_x, \\ A \cdot \sum_{i=1}^N H / \delta_{np} + d \cdot \sum_{i=1}^N Re_y \cdot H / \delta_{np} + e \cdot \sum_{i=1}^N Re_x \cdot H / \delta_{np} + f \cdot \sum_{i=1}^N (\delta_{np} / H)^2 = \sum_{i=1}^N Nu'_x \cdot \delta_{np} / H. \end{cases} \quad (15)$$

В результате описанной выше методики получены критериальные уравнения для насадки 3-17:

$$Nu'_x = Re_y^{0,247} \cdot Re_x^{-1,079}, \quad (16)$$

$$Eu = Re_y^{-0,312} \cdot Re_x^{1,554}. \quad (17)$$

В уравнениях (16), (17) отсутствуют коэффициенты Q и U из уравнений (3), (4) вследствие того, что их значения равны единице. Для геометрических симплексов d_s/H и δ_{np}/H были получены степени, близкие к нулю ($7,642 \cdot 10^{-16}$ и $-1,321 \cdot 10^{-16}$), что также приравнивает их величины к единице.

Определим среднюю относительную погрешность критериев Nu'_x и Eu [16]:

$$\delta = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^7 x_{i,\text{э.}}}{\sum_{i=1}^7 x_{i,\text{р.}}} \right) \cdot 100\%, \quad (18)$$

где $x_{i,э}$ – значения, полученные по экспериментальным данным;

$x_{i,р}$ – значения, полученные методом наименьших квадратов.

На рисунке 4 приведены зависимости изменения критерия Нуссельта и Эйлера от числа Рейнольдса газа для 3-17 при ее орошении. Линии построены по значениям уравнений (16), (17). Точками представлены показатели, полученные по уравнениям (7), (12).

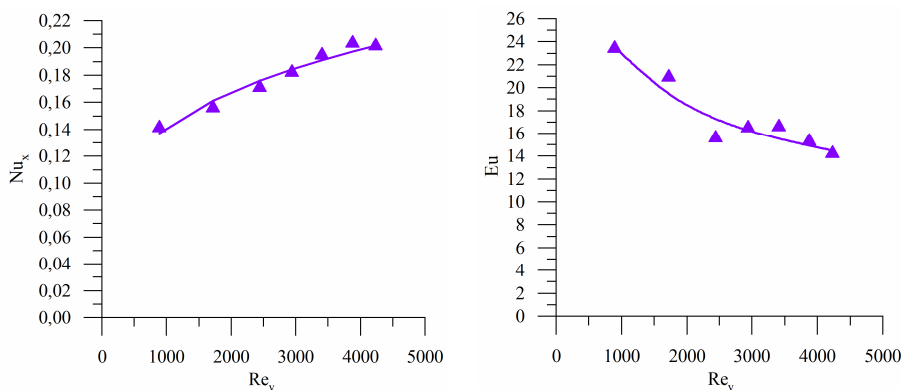


Рисунок 4. – Изменение критериев подобия для насадки 3-17

Исходя из рисунка 4, первоначально рассчитанные критерии по экспериментальным данным удовлетворительно описываются линиями, полученными по критериальным уравнениям с относительной погрешностью 0,043–0,828%.

Заключение. В данной работе представлена методика для определения коэффициентов и показателей степеней критериальных уравнения Нуссельта и Эйлера, позволяющая рассчитать интенсивность массоотдачи распределяемого компонента на границе раздела фаз и установить влияние геометрии на гидродинамику регулярно-структурированной зигзагообразной насадки. Выявлено, что максимальная погрешность была достигнута 0,828%. Следовательно, представленная методика может быть рекомендована для инженерных расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Контактные насадки промышленных теплообменных аппаратов / А.М. Каган [и др.]. – Казань : Отечество, 2013. – 454 с.
2. Aroonwilas, A. High-efficiency structured packing for CO₂ separation using 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) / A. Aroonwilas, P. Tontiwachwuthikul // Separation and Purification Technology. – 1997. – Vol. 98, № 12-1. – P. 67–79. – Режим доступа: [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(97\)00037-3](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(97)00037-3).
3. Investigation of hydrodynamic performance and effective mass transfer area for Sulzer DX structured packing / H. Gao [et al.] // AIChE Journal. – 2018. – Vol. 3726, № 10. – P. 3625–3637. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.16346>.
4. MellapakPlus: A new Generation of Structured Packings // Sulzer Chemtech Ltd, Wintthur, Switzerland, 1999. – Vol. 28. – Режим доступа: <https://www.sulzer.com>.
5. Вайтехович, П.Е. Сравнительный анализ эффективности регулярных насадок для массообменных аппаратов / П.Е. Вайтехович, Д.Ю. Мытько // Тр. БГТУ. Сер. 2, Хим. технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2020. – № 2. – С. 44–49. Режим доступа: https://elib.belstu.by/bitstream/123456789/35282/1/Vajtehovich_Sravnitel%27nyj.pdf.
6. Мытько, Д.Ю. Гидравлическое сопротивление регулярных насадок массообменных аппаратов / Д.Ю. Мытько, П.Е. Вайтехович // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Строительство. Приклад. науки. – 2020. – № 8. – С. 33–38. – Режим доступа: https://elib.belstu.by/bitstream/123456789/37387/1/Myt%27ko_gidravlichesкое.pdf.
7. Вайтехович, П.Е. Техничко-экономическое обоснование и выбор оптимальной насадки / П.Е. Вайтехович, Д.Ю. Мытько // Тр. БГТУ. Сер. 2, Хим. технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2021. – № 1 (241). – С. 69–73. – Режим доступа: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/39003>.
8. Рамм, В.М. Абсорбция газов / В.М. Рамм. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1976. – 656 с.
9. Гельперин, Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии / Н.И. Гельперин. – М. : Химия, 1981. – 812 с.
10. Флореа, О. Расчеты по процессам и аппаратам химической технологии / О. Флореа, О. Смигельский. – М. : Химия, 1971. – 448 с.
11. Гухман, А.А. Введение в теорию подобия / А.А. Гухман. – М. : Высш. шк., 1973. – 296 с.
12. Красовский, Г.И. Планирование эксперимента / Г.И. Красовский, Г.Ф. Филаретов. – Минск : Изд-во БГУ им. В.И. Ленина, 1982. – 302 с.
13. Грачев, Ю.П. Математические методы планирования экспериментов / Ю.П. Грачев, Ю.М. Плаксин. – М. : ДеЛиПринт, 2005. – 296 с.
14. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. – Л. : Химия, 1981. – 560 с.
15. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. – СПб. : ХИМИЗДАТ, 2009. – 543 с.

16. Савчук, В.П. Обработка результатов измерений / В.П. Савчук. – Одесса : ОНПУ, 2002. – Ч. 1. – 54 с.

REFERENCES

1. Kagan, A.M., Laptev, A.G., Pushnov, A.S., & Farakhov, M.I. (2013). *Kontaktnyye nasadki promyshlennykh teplomassoobmennyykh apparatov* [Contact nozzles for industrial heat and mass transfer devices]. Kazan: Otechestvo. (In Russ.).
2. Aroonwilas, A., & Tontiwachwuthikul, P. (1997). High-efficiency structured packing for CO₂ separation using 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP). *Separation and Purification Technology*, 12(1), 67–79. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(97\)00037-3](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(97)00037-3)
3. Gao, H., Liu, S., Luo, X., Zhang, H., & Liang, Z. (2018). Investigation of hydrodynamic performance and effective mass transfer area for Sulzer DX structured packing. *AIChE Journal*, 10, 3625–3637. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.16346>
4. MellapakPlus: A new Generation of Structured Packings // Sulzer Chemtech Ltd, Wintthur, Switzerland, 1999. – Vol. 28. <https://www.sulzer.com>.
5. Vaytsekhovich, P.Ye., & Mytsko, D.Yu. (2020). Sravnitel'nyy analiz jeffektivnosti reguljarnykh nasadok dlja massoobmennyykh apparatov [Comparative analysis of the effectiveness of regular packings for mass transfer apparatus]. *Trudy BGTU [Proceedings of BSTU]*, 2, 44–49 (in Russ., abstr. In Engl.). https://elib.belstu.by/bitstream/123456789/35282/1/Vajtehovich_Sravnitel%27nyj.pdf
6. Mytsko D.Yu., & Vaytsekhovich P.Ye. (2020). Gidravlichesкое soprotivlenie reguljarnykh nasadok massobmennyykh apparatov. [Hydraulic resistance of regular attachments of mass exchange devices]. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta [Herald of Polotsk State University]*, 8, 33–38 (in Russ., abstr. In Engl.). https://elib.belstu.by/bitstream/123456789/37387/1/Myt%27ko_gidravlichesкое.pdf
7. Vaytsekhovich, P.Ye., & Mytsko, D.Yu. (2021). Tehniko-jekonomicheskoe obosnovanie i vybor optimal'noj nasadki [Feasibility study and selection of the optimal packing]. *Trudy BGTU [Proceedings of BSTU]*, 1(241), 69–73 (in Russ. abstr. In Engl.). <https://elib.belstu.by/handle/123456789/39003>
8. Ramm, V.M. (1976). *Absorbicija gazov* [Gas absorption]. Moscow: Himija. (in Russ.).
9. Gel'perin, N.I. (1981). *Osnovnye processy i apparatay himicheskoy tehnologii* [Basic processes and devices of chemical technology]. Moscow: Himija. (in Russ.).
10. Florea, O., & Smigel'skij, O. (1971). *Raschety po processam i apparatam himicheskoy tehnologii* [Calculations for processes and devices of chemical technology]. Moscow: Himija. (in Russ.).
11. Guhman, A.A. (1973). *Vvedenie v teoriju podobija* [Introduction to similarity theory]. Moscow: Vysshaya shkola. (in Russ.).
12. Krasovskij, G.I., & Filaretov G.F. (1982) *Planirovanie jeksperimenta* [Experiment planning]. Minsk: BGU. (in Russ.).
13. Grachev, Ju.P., & Plaksin, Ju.M. (2005). *Matematicheskie metody planirovaniya jeksperimentov* [Mathematical methods for planning experiments]. Moscow: DeLiprint. (in Russ.).
14. Pavlov, K.F., Romankov, P.G., & Noskov, A.A. (1976). *Primery i zadachi po kursu processov i apparatov* [Examples and tasks for the course of processes and devices]. Leningrad: Himija. (in Russ.).
15. Romankov, P.G., Frolov, V.F., & Flisjuk, O.M. (2009). *Metody rascheta processov i apparatov himicheskoy tehnologii* [Methods for calculating processes and devices of chemical technology]. Saint Petersburg: HIMIZDAT. (in Russ.).
16. Savchuk, V.P. (2002). *Obrabotka rezul'tatov izmerenij. Ch. 1* [Processing of measurement results. P. 1]. Odessa: ONPU. (in Russ.).

Поступила 27.08.2021

SIMILARITY OF PROCESSES OF HYDRODYNAMICS AND MASS TRANSFER IN A REGULAR STRUCTURED NOZZLE

P. VAYTEKHOVICH, D. MYTSKO

In this work, a promising direction in the development and research of contact devices for mass transfer devices is determined. The advantages of the developed regularly-structured zigzag packing are described, and stable modes of operation in the range of gas velocities are noted. The influence of the geometric parameters of the packing on its hydraulic and mass transfer characteristics has been investigated. It is noted that the efficiency of mass transfer was estimated from the height of the transfer unit on a model system during desorption of carbon dioxide from water. The technique of the theory of similarity is considered for the possibility of scaling and using the obtained data in the calculation of industrial devices. Criteria are given that have the greatest impact on the intensity of mass transfer and hydrodynamics. Functional dependencies and methods for calculating the determined criteria are presented. The coefficients and exponents of the criteria equations are obtained by the least squares method using a system of normal equations. The range of errors of the obtained data is determined.

Keywords: mass transfer apparatus, regularly structured packing, hydrodynamics, mass transfer, similarity theory, criterion equations.

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

Современный ученый – это человек, идущий в ногу со временем, генерирующий актуальные знания, ищущий новые пути решения проблем. На начальном этапе пути молодому ученому необходимы знания и навыки не только для оформления научной работы, поиска и анализа информации, но и для публикации полученных результатов.

Именно с этой целью в Полоцком государственном университете 2–3 декабря 2021 г. состоялся научно-практический семинар **«Современная цифровая научная среда: технологии и инструменты ученого»**. На семинаре были заслушаны доклады ученых университета и ведущих специалистов научной библиотеки. Некоторые выступления на семинаре приведены в виде статей в этом номере журнала.

В статье профессора В.П. Иванова **«Научная статья в системе диссертационного исследования»** отражены связи между частями диссертации и научными статьями по ее теме. Показано, что качественные статьи по теме диссертации – это предпосылка получения качественной диссертации.

Профессор И.Н. Андреева в статье **«Как написать научную статью»** изложила рекомендации по написанию структурных частей статьи.

Доцент А.М. Нияковский поделился опытом своей работы в статье **«Из опыта работы над статьями по теме диссертации»**.

Заведующий библиотекой университета М.Н. Шуханкова в статье **«Современная цифровая научная среда: технологии и инструменты ученого»** дала ответы на вопросы: как подобрать журнал для публикации статьи, как найти информацию с использованием ресурсов Научной библиотеки, как открыть авторские идентификаторы ORCID, Scopus Author ID, Researcher ID и как система «Антиплагиат. Вуз» обнаруживают текстовые заимствования.

Информация будет полезна для начинающих и опытных ученых в их научно-исследовательской деятельности.

УДК 378.245.2

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ В СИСТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

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

Приводятся основные термины и определения диссертационного исследования и опубликованных по теме диссертации научных статей, Установлены связи между характеризующими признаками диссертации и статьи. Показано, что качество диссертации связано с качеством статейного материала, поэтому качество диссертации можно довести до нормативного уровня использованием приведенных мер.

Ключевые слова: диссертация, научная статья, характеризующий признак, связь между признаками, качество статьи.

Около 15% кандидатских и 20% докторских диссертаций после защиты снимаются с рассмотрения соискателями или отклоняются Президиумом ВАК. Недостатки диссертаций, выявленные ВАК при их изучении в экспертном совете¹ [1], следующие:

- неполнота представленных соискателем выводов;
- неточности разрабатываемых математических и экспериментальных моделей;
- малоинформативность материалов, включенных соискателем в содержание диссертации и автореферата;
- недостаточность количественных результатов, отражающих научную новизну авторских решений в выводах по диссертации;
- некорректность оценки экономического эффекта;
- смысловое подобие формулировок научной новизны, выносимых на защиту положений, задач исследования и выводов диссертации.

Ряд указанных проблем возникает на стадии подготовки статейного материала, который ложится в основу будущей диссертации, и их можно избежать. По результатам прочтения статей, в которых приведены результаты диссертационных исследований, в большинстве случаев можно судить о содержании и качестве самой диссертации.

Цель настоящей работы – способствовать достижению высокого научного уровня диссертаций, базирующихся на статейных журнальных материалах, из расчета, чтобы эти диссертации успешно защищались и безо всяких коллизий проходили процедуру утверждения ВАК.

Основные определения из нормативных документов, используемые в рамках настоящей работы, следующие.

Диссертация – самостоятельно выполненная квалификационная научная работа, имеющая внутреннее единство и свидетельствующая о личном вкладе автора в науку и посвящена решению научной задачи или изучению выбранной научной проблемы².

Кандидатская диссертация должна содержать новые научные теоретические и (или) экспериментальные результаты по одному из актуальных направлений научных исследований.

Характеризующие признаки диссертации:

- постановка проблемы и определение ее актуальности;
- объект исследования;
- предмет исследования;
- цель работы;
- задачи исследования;
- научная новизна;
- положения, выносимые на защиту;
- выводы по диссертации и их значимость.

Научная проблема – комплекс теоретических и практических научных задач, которые взаимосвязаны друг с другом таким образом, что без решения одной из них невозможно решить проблему в целом.

¹ Головнич, А.К. Повышение контроля над содержанием диссертаций и практикоориентированность диссертационных исследований : доклад председателя экспертного Совета № 20 на расширенном заседании Коллегии ВАК (17 июня 2021 г., Минск) / А.К. Головнич. – 2021. – 4 с.

² Положение о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (в ред. Указов Президента Республики Беларусь от 01.12.2011 № 561, от 30.12.2011 № 621, от 16.12.2013 № 560). URL: <https://imb.by/abiturientu-aspirantura/87-normativno-pravovye-akty.html>

Проблема определяется как поисковая форма научного знания (возникающего в ходе познания вопроса или целостного комплекса вопросов), посредством которого фиксируется достигнутый уровень изученности объекта и определяется направление дальнейших исследований. Для своего решения проблема требует значительного углубления существующих представлений на основе фундаментальных исследований, применения новых технологий или более совершенных технических средств. Такая ситуация постоянно возникает не только в области фундаментальных и прикладных исследований, но и в процессе объективного развития каждой из отраслей производства. Основное требование к формулировке научной проблемы – она должна включать минимально возможный круг задач. Увеличение без нужды числа задач, как правило, приводит к трудностям в формулировании конечных результатов, а иногда и к некорректности обоснования путей решения самой проблемы.

Научная задача – состояние противоречия между достигнутым уровнем знаний в конкретной научной области и новыми объективными фактами, полученными на практике и не вписывающимися в существующие представления этой области.

Актуальность материала приводится во введении работы как обоснование необходимости ее выполнения. В случае теоретической работы понятие актуальности определяется и как необходимость доказательства выдвинутых ранее гипотез, а также дальнейшего развития положений, разрабатываемых той или иной научной школой. В технических диссертациях актуальность описывается требованиями практики. Польза статьи определяется возможностью применения ее материала для удовлетворения запросов производства, обслуживаемого наукой.

Объект исследования – часть реального мира, которая познается, исследуется и (или) преобразуется исследователем. Объект исследования – то в объективной реальности, на что направлена предметно-практическая и познавательная деятельность субъекта, что противостоит ему как непонятное, в форме, непригодной для непосредственного использования. Объектами исследования могут быть устройства, процессы, материалы и др.

Предмет исследования – зафиксированные в опыте и включенные в практическую деятельность человека свойства и отношения объектов, исследуемых с определенной целью в данных условиях и обстоятельствах. Другими словами, предмет исследования – то новое научное знание, в котором заключены теории, законы, закономерности, механизмы превращений материалов, принципы, зависимости и др.

Цель работы трактуется как достижение более высокого результата в обслуживаемом наукой производстве. Без научной окраски цель обусловлена требованием практики.

Научная новизна как свойство научного материала, определяется тем, что полученные и обоснованные результаты публикуются впервые. Доказательство наличия новизны закрепляет за автором кроме научного, также и юридический приоритет в выбранной области знаний.

Положения, выносимые на защиту, – основные компоненты общей характеристики работы. Они содержат информацию о научной и практической значимости работы (таблица 1), их соискатель раскрывает и отстаивает во время публичной защиты перед членами совета по защите диссертации.

Таблица 1. – Структура положения, выносимого на защиту

Компонент положения	Содержание компонента
Название	Наименования нового научного знания, заключенного в понятии положения: теория, закон, закономерность, принцип, зависимость, процесс и др.
Содержание, начинающееся словом «включающий (ая) (ее)»	Перечисление составных частей положения, относящихся к предмету исследования
Отличия, начинающиеся словом «отличающийся (аяся) (щеся)»	Раскрытие сути нового научного знания, описывающего предмет исследования
Что дает положение теории и практике, начинающееся словами: «что дает», «что обеспечивает» и др.	Раскрытие в количественном виде значения положения для теории и практики, касающееся достижения цели исследования, изменений в предмете и объекте исследования

Выводы завершают главы диссертации и содержат тезисы основных достижений проведенного исследования без авторской интерпретации. Это дает возможность самим читателям оценить качество выводов.

Значимость диссертации и личный вклад соискателя приводят в заключении совета по защите диссертаций, составляемого в конце заседания.

В *заключении* кратко формулируют основные результаты, полученные соискателем. Оно содержит емкое изложение сущности результатов работы, обладающих научной новизной, практической и экономической значимостью, а также другие сведения (методики, повышающие достоверность результатов, экспериментальные установки, моделирующие технологические процессы, и др.). В этой части работы автор излагает значение работы, прежде всего, с субъективной точки зрения. Он представляет полученные результаты на основе своего опыта и знаний. В ряде диссертаций в разделе «Заключение» автор приводит интерпретацию полученных результатов в соответствии с каждой из поставленных задач исследования. Необходимо избегать простого пересказа положений работы, в заключении материал должен быть обобщен.

Качество диссертации – степень соответствия характеризующих признаков диссертации (таблица 2) требованиям нормативных документов.

Связь этапов работы над диссертацией с ее характеристическими признаками обеспечивает методическую основу для самотестирования результатов и последующего внешнего рецензирования на всех стадиях контроля содержания диссертации. Важным является определение как общих признаков и различия статьи и диссертации, так и выработка мер по повышению качества их материалов.

Таблица 2. – Связь характеризующих признаков диссертации и статьи по теме диссертации

Характеризующие признаки	Соотношение признаков
Научная специальность	Научные специальности диссертации и статей совпадают
Постановка проблемы и определение ее актуальности	Постановка в статье научной задачи исследования как части научной проблемы диссертации
Объект исследования	Полное совпадение признаков в диссертации и в статье
Предмет исследования	Предмет исследования в статье является, как правило, частью предмета исследования диссертации
Цель работы	Полное совпадение признаков в диссертации и в статье
Задачи исследования	Постановка в статье научной задачи исследования как части научной проблемы диссертации
Научная новизна	Научная новизна результатов диссертации должна быть представлена в статьях
Положения, выносимые на защиту	Все положения, выносимые на защиту в диссертации, должны быть опубликованы в статьях
Выводы по диссертации и их значимость	Желательно, чтобы выводы по диссертации и их значимость были представлены в статьях

Научная статья – законченное и логически цельное произведение, посвященное решению научной задачи, являющейся частью научной проблемы, при выполнении диссертационного исследования. Научная статья раскрывает наиболее значимые результаты, полученные соискателем, требующие развернутого изложения и аргументации³.

Для того чтобы статья была зачтена ВАК в качестве научной публикации соискателя по теме диссертации, она должна быть опубликована, во-первых, в одном из научных изданий Республики Беларусь, имеющих разрешение для опубликования результатов диссертационных исследований, во-вторых, по заявленной Вами специальности. Научные статьи, публикуемые в изданиях, включенных в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований, имеют устоявшуюся каноническую структуру, определенную нормативными документами, проходят рецензирование и включают следующие элементы:

- название;
- аннотация;
- фамилия и инициалы автора (авторов) статьи, ее название;
- введение;
- основная часть, включающая графики и другой иллюстративный материал (при их наличии);
- заключение, завершаемое четко сформулированными выводами;
- список цитированных источников;
- дата поступления статьи в редакцию печатного издания.

Дополнительно в соответствии с требованиями редакций научных изданий в структуру статьи могут быть также включены:

- перечень принятых обозначений и сокращений;
- аннотация на английском и (или) ином иностранном языке.

Достижение цели связано с решением некоторого числа научных задач. В диссертации эти задачи должны быть обязательно прописаны, в статье могут быть приведены. В число этих задач включают лишь те, которые способствуют достижению цели, и исключаются лишние.

Название статьи должно отражать основную идею выполненного исследования, быть кратким, содержать ключевые слова. Некоторые исследователи считают, что название как диссертации, так и статьи состоит из цели и средства достижения этой цели.

Объем понятия, заключенного в названии работы, должен быть равен объему понятия, заключенному в ее последующем материале. Несоответствие этих объемов – это чаще всего неряшливость автора. Когда название статьи шире объема материала самой статьи, автор ориентирует читателя на ожидание отсутствующего материала; в противном случае, когда название по смыслу уже материала статьи, возможно потеря того, что автор считает важным.

³ Инструкция о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации) на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, автореферата и публикаций по теме диссертации (в ред. постановления ВАК от 30.06.2012 № 5). URL: <https://vak.gov.by/On-Approval-of-Instruction>

Аннотация должна ясно излагать содержание статьи и быть пригодной для опубликования в аннотациях к журналам отдельно от статьи.

Во *введении* статьи дается краткий обзор литературы по данной проблеме, называются нерешенные ранее вопросы, формируется и обосновывается цель работы и, если необходимо, указывается ее связь с важными научными и практическими направлениями. Функции раздела «Введение» в диссертации и статьи схожи. Анализ источников, использованных при подготовке научной статьи, должен свидетельствовать о знании автором статьи научных достижений в соответствующей области. Обязательными являются ссылки на работы других авторов, включая зарубежные публикации в данной области.

Что касается списка литературы, количества источников, на которые делаются ссылки, то следует исходить из принципа необходимости и достаточности: каждый источник необходим для обоснования и достижения цели исследования или объяснения поставленного вопроса, а все вместе они достаточны для описания этого результата.

Стройная структура статьи предполагает, что поставленная в ней цель достигается посредством решения корректно поставленных задач, выводящего на защищаемые положения, способные стать базой для основных научных результатов.

Основная часть статьи содержит описание методик, аппаратуры, материалов, объектов исследования, подробно освещает содержание исследований, проведенных автором, и дает четкое представление о том, каким образом получено новое научное знание. Полученные результаты должны быть проанализированы с точки зрения их достоверности, научной новизны и сопоставлены с соответствующими известными данными. Не лишним будет обозначить практикоориентированность материала статьи.

Заключение статьи имеет структуру выводов. Выводы опираются только на сведения, приведенные в материале статьи. Обычно первый вывод заключения посвящен ответу на вопрос – как и за счет чего достигнута цель работы, последний – с каким эффектом она достигнута. Во многих статьях в разделе «Заключение» авторы приводят интерпретацию полученных результатов в соответствии с каждой из поставленных задач исследования. В выводах полезно показать – какие возникли вопросы, требующие дальнейшего научного разрешения. Если читатель знает – какие фрагменты статьи поддерживают конкретные выводы, то он лучше оценит доказательства, приведенные в статье.

Рецензия – документ, содержащий всестороннюю оценку с позиций качества статейного материала⁴. При подготовке рецензии отмечают:

- соответствие статьи отрасли науки или научному направлению, закреплённым за журналом;
- соответствие объема и частей статьи правилам оформления согласно Инструкции;
- актуальность темы, новизну полученных результатов, их научную, практическую, экономическую и социальную значимость, достоверность в сопоставлении с соответствующими известными данными;
- логику изложения и четкость формулировок;
- информативность и качество иллюстрируемого материала;
- полноту списка литературы, наличие публикаций последних лет (в т.ч. зарубежных) в данной области;
- соответствие аннотации тексту статьи;
- наличие недостатков в виде замечания и необходимость их исправления;
- аргументированное мнение о возможности опубликования статьи в представленном автором виде или после устранения недостатков с повторным рецензированием (без рецензирования). Если рецензент не рекомендует статью к опубликованию, то указываются конкретные недостатки, послужившие причиной этого решения.

Таким образом, главное в подготовке и написании статьи – придать описанию структуры ее характеризующих признаков свойства системы как целостного множества элементов, находящихся друг с другом в связях и отношениях и объединенных общей целью.

В остальном правила хорошего тона советуют, чтобы автор статьи критиковал то, что будет улучшено его работой, а остальное не трогал [2]. Критика должна быть позитивной, способствующей движению вперед и направленной на дела, а не на личность.

Привлекательность и наглядность как теоретического, так и экспериментального материалов зависят от его представления. Эффектное изложение текста сопровождается иллюстративным материалом в виде рисунков, графиков, диаграмм, схем, таблиц, графических моделей и др. Формулы, уравнения, рисунки, фотографии и таблицы должны иметь подписи или заголовки. При их оформлении руководствуются ГОСТ 2.105-95 и ГОСТ 7.32-2001. Все приведенные математические и физические величины с указанием размерностей должны быть расшифрованы.

Библиографические ссылки позволяют Вам отгородиться от усмотрения в статье признаков заимствования и присвоения чужих идей. В статье автор должен давать сведения о цитируемом, рассматриваемом или упоминаемом в тексте статьи материале с указанием его авторов и источников. Ссылки приводятся также на соб-

⁴ Положение о научном журнале «Вестник Полоцкого государственного университета», № 2 от 14.01.2021 года. – 10 с.

ственные публикации. Библиографический список имеет самостоятельное значение в качестве библиографического пособия. Опытный читатель обратит внимание на этот список и оценит авторское знание источников по теме исследования.

Уделите особое внимание стилю изложения. Величественный стиль в науке не в моде. Автор, который употребляет пышный язык, может попасть под подозрение, что ему нечего сказать. Используйте устоявшуюся, а лучше из терминологических стандартов, терминологию. Сложные термины применяйте по мере необходимости, поясняйте значение новых слов. Русский язык богат, его возможности безграничны, поэтому иностранные слова следует употреблять к месту. Слова, не несущие смысловой нагрузки, являются бесполезными, их без сожаления исключайте из текста. Старайтесь, чтобы каждое слово было значащим.

Постарайтесь логично подвести изложение материала к окончательным выводам, грамотно и четко изложить их. Именно выводы содержат основную научную ценность статьи, а наблюдения, аргументы и доказательства лишь подкрепляют их.

Установлены связи между характеризующими признаками диссертации и статьи. Статьи пишутся и публикуются раньше самой диссертации, при этом полное или частичное совпадение по объему характеризующих признаков диссертации и статьи по теме диссертации позволяют утверждать, что качественная статья – это предпосылка получения качественной диссертации. Показано, что качество диссертации связано с качеством статейного материала, поэтому качество диссертации можно довести до нормативного уровня использованием приведенных мер по повышению качества статей по теме диссертации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Головнич, А.К. Системный анализ характеризующих признаков диссертационной работы / А.К. Головнич // Вестн. Белорус. гос. ун-та транспорта. Наука и транспорт. – 2021. – № 1(42). – С. 1–7.
2. Иванов, В.П. Как писать научную статью (структура и организация работы) / В.П. Иванов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 3. – С. 195–199.

REFERENCES

1. Golovnich, A.K. (2021). Sistemnyy analiz kharakterizuyushchikh priznakov dissertatsionnoy raboty [System analysis of the characterizing features of the dissertation work]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta. Nauka i transport* [Herald Belarusian State University of Transport. Science and transport], 1(42), 1–7. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Ivanov, V.P. (2016). Kak pisat' nauchnyuyu stat'yu (struktura i organizatsiya raboty) [How to write a scientific article (structure and organization of work)]. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta* [Herald of Polotsk State University], 3, 195–199. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 11.01.2022

SCIENTIFIC ARTICLE IN THE DISSERTATION SYSTEM RESEARCH

V. IVANOV

The main terms and definitions of the dissertation research and scientific articles published on the topic of the dissertation are given, the connections between the characterizing features of the dissertation and the article are established. It is shown that the quality of the dissertation is related to the quality of the article material; therefore, the quality of the dissertation can be brought to the normative level using the above measures.

Keywords: *dissertation, scientific article, characterizing the feature, the relationship between the features, the quality of the article.*

УДК 167.7

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ НАПИСАНИЯ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

д-р психол. наук, проф. И.Н. АНДРЕЕВА
(Полоцкий государственный университет)

Представлены рекомендации по написанию научной статьи. Приводятся общие требования к научной статье, а также рекомендации по написанию ее структурных частей.

Ключевые слова: научная статья, структура научной статьи, требования к научной статье.

Научная статья и ее виды. Основной формой научной публикации является статья (в сборнике, научном журнале). Научная статья – это законченное авторское произведение по результатам оригинального научного исследования. Выделяют следующие виды подобных статей: 1) научно-теоретические, описывающие результаты исследований, выполненных на основе теоретического научного поиска и объяснения явлений и их закономерностей; 2) научно-практические (эмпирические), в которых представлены результаты экспериментов и реального опыта; 3) обзорные, посвященные анализу научных достижений за последние несколько лет; 4) методологические – по приемам, способам, инструментам научного исследования, позволяющим добиваться решения научных или прикладных задач. Перед написанием статьи следует обдумать, каков статус и жанр предлагаемого материала: теоретическая работа или эмпирическая, носит ли она научно-популярный или сугубо профессиональный характер; кто будет читателем статьи: неподготовленные читатели, начинающие исследователи (студенты, магистранты), аспиранты или опытные исследователи.

Когда писать статью? Тогда, когда автором получены новые научные результаты, представляющие интерес для научной общественности. Главная мотивация при этом – поделиться с другими учеными самостоятельно добытым научным знанием. Плохо, если автор пишет статью только для того, чтобы «пройти аттестацию в аспирантуре» или потому, что «так требует научный руководитель». «Публикуя статью, автор преследует две основные цели:

- Завершить этап выполняемых им исследований и «застолбить» свой приоритет.
- Продемонстрировать свою компетентность и квалификацию в рассматриваемой области, получить признание научной общественности» [1, с. 24].

Требования, предъявляемые к научной статье. *Полная ясность и простота выражений.* Научная статья – это не американский роман, а поэтому такие литературные приемы, как сюжетная неопределенность, удерживающая интерес читателя, или опущенные подробности, вызывающие его любопытство, совершенно неуместны. При написании научных статей необходимо стремиться к полной ясности и простоте выражений. Автор должен так написать о том, что неизвестно другим, чтобы это неизвестное стало ясным читателю в такой же степени, как и ему самому [2].

Все хорошие отчеты и описания выполнены *в соответствии с правилами грамматики*. Грамматические ошибки создают двусмысленные и неуклюжие места в работе, поэтому первый шаг в обучении составлению научных отчетов – это усвоение основных грамматических правил построения предложения.

Отсутствие двусмысленности. Любое научное сообщение – это прежде всего текст, организованный по определенным правилам. Различают два вида текстов: на естественном («природном», обыденном) языке и научном. Любое представление результатов исследования по сути своей является текстом «смешанного» вида, где в естественноречевую структуру включены «куски», сформулированные на строго понятийном языке. Эти языки нельзя строго разграничить, т.к. все время происходит взаимопроникновение житейского и научного: научные термины входят в повседневное обращение, а наука черпает из естественного языка слова для обозначения вновь открытых сторон реальности. Например, мы свободно употребляем в повседневной речи слова, изобретенные учеными: «кислород» (М. Ломоносов), «экстраверсия» (К. Юнг), «условный рефлекс» (И. Павлов), «кварк» (Д. Геллман). С другой стороны, в теорию элементарных частиц вошли слова «цвет», «очарованность», «странность» для обозначения состояний кварков. В психологии в качестве научных терминов употребляются «память», «мышление», «внимание», «чувство». Но в отличие от обыденного языка научный термин имеет однозначное предметное содержание. Чтобы избежать неясностей, автору необходимо следовать определенным правилам:

- употреблять только самые ясные и недвусмысленные термины;
- не использовать слово, имеющее два значения, не определив, в каком из них оно будет применено;
- не применять одно слово в двух значениях и разные слова в одном значении;
- не злоупотреблять иноязычными терминами.

Последовательность и логичность изложения. Логичность – это последовательность расположения всех единиц текста и наличие связей между ними. Последовательностью обладает только такой текст, в котором выводы вытекают из содержания, они не противоречивы, при этом текст разбит на отдельные смысловые

отрезки, отражающие движение мысли от частного к общему или от общего к частному. Автор должен по возможности не загружать текст избыточной информацией, но может использовать метафоры, примеры и «лирические отступления» для того, чтобы привлечь внимание к особо значимому для понимания сути звену рассуждений. Научный текст, в отличие от литературного текста или повседневной речи, очень клиширован – в нем преобладают устойчивые структуры и обороты. В этом он сходен с «канцеляритом» – бюрократическим языком деловых бумаг. Роль этих штампов чрезвычайно важна – внимание читателя не отвлекается на литературные изыски или неправильности изложения, а сосредоточивается на значимой информации: суждениях, умозаключениях, доказательствах, цифрах, формулах. «Наукообразные» штампы на самом деле играют важную роль «рамки», стандартной установки для нового научного содержания, являются своеобразными дорожными знаками, предупреждающими о поворотах мысли автора. Ниже показано, для каких целей используются те или иные научные клише.

Дополнение: кроме того, более того, помимо этого, также.

Примеры: а именно, к примеру, в качестве иллюстрации, рассмотрим, в частности.

Уточнение: в конечном счете, иначе говоря, то есть, фактически, иными словами.

Сравнение: подобно тому, как; как и; точно так же, как.

Противопоставление: в противоположность, напротив, в то время как, с другой стороны, тем не менее.

Причина и следствие: исходя из, согласно, итак.

Выводы: в итоге, обобщая сказанное, подводя итоги, в результате, итак, таким образом.

Почему автор не может раскрыть тему? Этому есть несколько причин:

- 1) долгий «разгон» (слишком объемное введение);
- 2) слабые связи между компонентами текста;
- 3) частые отвлечения и отклонения от темы;
- 4) нежелание или неумение автора «отсечь» все лишнее;
- 5) множество вводных слов и предложений («известно», «очевидно»), которые не несут смысловой нагрузки.

Далее рассмотрим требования к основным разделам статьи.

В **титule статьи** указываются имя и фамилия автора (авторов) и место его работы. Как правило, *нельзя стать соавтором без значительного вклада в проводимую работу*. Участие в планировании исследования, помощь в его организации, сбор данных, работа по их анализу и высказывание своего мнения по поводу статьи, написанной другим исследователем, будут значительным вкладом в работу. Но ввода данных в таблицу и изготовления мультимедиа-презентации к конференции будет недостаточно, чтобы войти в соавторы. *В работах, имеющих несколько авторов, главным автором (т.е. тем, чье имя указано первым на титульном листе) должен быть исследователь, проделавший большую часть работы*. Когда исследователи ведут групповую работу над проектом, у них должен быть лидер, ответственность которого будет достаточно большой и который станет главным автором исследования.

Внимательно обдумайте **название статьи**. Заголовок должен выполнять две задачи: отражать содержание статьи и привлекать интерес читателей. Формулировка названия должна быть ясной по форме (без двусмысленностей), библиографически и содержательно точной (включать ключевые слова), конкретной (следует избегать слов «некоторые», «определенные», «особые», а также тавтологических фраз). Ключевые слова выражают основное смысловое содержание материала, служат ориентиром для читателя и используются для поиска статей в электронных базах. Из-за неточного названия нужная статья может оказаться незамеченной. Название должно нести в себе определенную проблему или хотя бы намек на нее [3]. При этом нужно разделять научные и исследовательские проблемы. Проблема – это вопрос, на который нет готового ответа, она обычно понимается как «несоответствие наших знаний об объекте другим знаниям о нем, обыденным представлениям, здравому смыслу. Это некий парадокс... загадка, которую предлагается разгадать, puzzle, противоречие в понимании, нестыковка смыслов и интерпретаций» [3, с. 278].

Название не должно быть слишком длинным (не более 10–12 слов). Кроме того, важно, чтобы оно соответствовало требованиям грамматики, например, нельзя допускать три родительных падежа в одном предложении. Перед тем, как дать название статье, новичку рекомендуется посоветоваться с человеком, опытным в этом вопросе.

Статью сопровождает изложение содержания – **аннотация (abstract)** (100–150 слов): информация о проблеме исследования, его предмете, об испытуемых, о методе, результатах и главные выводы. Этот раздел выполняет функцию расширенного названия статьи [2]. Аннотация показывает, что, по мнению автора, наиболее ценно и применимо в данной работе [1]. Этот раздел читают в первую очередь, а пишут в последнюю. Кроме того, большой объем данной в статье информации вынуждает многих читателей сначала просматривать обзоры, чтобы понять, стоит ли изучать статью более подробно, и нередко они ограничиваются только этим разделом. Резюме содержания статьи идет в реферативный журнал. В некоторых журналах краткое резюме принято предпосылать статье, в других – оно помещается в конце статьи.

Поскольку аннотация не превышает 150 слов, ее необходимо очень тщательно готовить и отбирать каждое слово. Первое предложение раздела наиболее информативно. В нем формулируют проблему и обычно зна-

комат читателей с исследуемыми индивидуумами и/или переменными. Кроме обобщающего содержание статьи первого предложения обзор включает информацию о методе, краткое изложение важнейших результатов (второе по важности предложение) и обычно заканчивается кратким выводом.

Во **введении** подробно описывается *изучаемая проблема, проводится обзор литературы по данной теме и указываются известные и неизвестные аспекты проблемы, анализируются противоречия в результатах*, полученных до настоящего момента. Проводится критический, но при этом уважительный анализ исследований предшественников. Неизвестные или неясные аспекты предполагают одно или несколько предсказаний, образующих *гипотезу исследования*.

Во введении разъясняются ограничения данной работы, т.к. читателю важно представлять себе, на что он может, а на что не может рассчитывать. И, конечно же, нужно предложить читателю хотя бы самое простое обоснование структуры работы: в какой последовательности будет излагаться материал и чем обусловлена именно такая логика [3].

Таким образом, введение включает в себя, обычно в указанном порядке, формулировку проблемы, обзор соответствующей исследовательской литературы, а также одну или несколько гипотез, проверяемых в ходе исследования. Приводится *список изучаемых и контролируемых переменных* (зависимая, независимая, дополнительные и другие внешние переменные), а также дается прогноз исхода исследования.

В правильно написанном введении гипотезы естественным образом следуют из предшествующего описания проблемы и обзора литературы и приводятся в последнем абзаце. В слабом введении гипотезы без подготовки появляются в конце раздела и не имеют рационального основания. Проводимый во введении обзор литературы включает лишь те исследования, которые непосредственно связаны с работой, представленной в лабораторном отчете.

Одна из задач введения – заинтересовать читателя своей проблемой. Это возможно только при наличии глубокого личного интереса к ней.

Метод. Основной принцип написания раздела «Метод» заключается в том, что этот раздел должен быть достаточно подробным, чтобы другие исследователи могли прочесть его и воспроизвести исследование по предлагаемому плану в своих лабораториях.

Результаты. Главный раздел статьи посвящается представлению и анализу результатов. В начале этого раздела рекомендуется напомнить постановку проблемы и исходную гипотезу. Затем сжато, соответствующими значениями показателей, а также значениями критериев и уровня достоверности приводятся основные результаты. Дается представление об общей структуре результатов и их статистической значимости.

В этом разделе отчета приводится краткое, но законченное описание результатов, а также данные статистики. Обычно абзац раздела о результатах включает в себя описание полученного результата и соответствующие данные описательного и заключительного статистического анализа. Не следует объяснять причины того, что прогноз оказался верным или наоборот, – это делается в разделе «Обсуждение».

Лучше всего представить результаты в том порядке, в котором следуют гипотезы во введении. Например, если введение заканчивается тремя гипотезами, раздел о результатах должен содержать абзацы, посвященные каждой из них, в том же порядке.

Результаты исследования обычно представляют в виде таблиц или графиков. Существует ряд простых рекомендаций по построению графиков. В частности, Л.В. Куликов [4] дает следующие советы начинающим исследователям:

1. График и текст должны взаимно дополнять друг друга.
2. График должен быть понятен «сам по себе» и включать все необходимые обозначения.
3. На одном графике не разрешается изображать больше четырех кривых.
4. Линии на графике должны отражать значимость параметра, важнейшие необходимо обозначать цифрами.
5. Надписи на осях следует располагать внизу и слева.
6. Точки на разных линиях принято обозначать кружками, квадратами и треугольниками.

Иногда бывает нелегко решить, как представить данные – в виде таблицы или рисунка. Таблицы обычно используют, *если важно указать точные значения среднего арифметического (на основании графика точные значения можно лишь предположить) или если данных так много, что график будет ими перегружен*. Графики могут помочь более наглядно представить ситуацию. Но необходимо учесть, что *представлять данные несколькими способами — и в виде таблицы, и в форме графика — не следует*.

Недостаточно просто представить таблицу или график – в разделе «Результаты» необходимо сослаться на них и указать их важнейшие особенности.

Обсуждение результатов представляет собой последний раздел, содержащий текстовые материалы, и служит для связи отчета в единое целое. Оно начинается с обобщения основных результатов, представляемых в соотношении с исходной гипотезой (гипотезами). Далее следует важнейшая часть раздела – интерпретация результатов. Проводимая оценка исследования включает установление взаимосвязи результатов с теоретическими вопросами, поднятыми во введении, и объяснение неоправдавшихся прогнозов. Кроме этого, в ходе обсуждения рассматривается проблема альтернативных объяснений результатов. Автор статьи должен решить, какая из интерпретаций представляется наиболее рациональной, но иногда можно предположить несколько

объяснений. Необходимо указать альтернативные варианты и объяснить, почему этот – лучший из всех. Завершает обсуждение важный элемент любой исследовательской программы – вопрос «что дальше?» Обычно исходя из результатов проведенного изыскания, авторы могут предложить варианты новых экспериментов и будущих исследований. Хорошее исследование всегда отвечает на одни вопросы и поднимает другие.

Заключение включает краткие выводы по результатам исследования [5]. Рекомендуется: а) сделать заключение полноценным разделом публикации, описав в нем тезисно основные идеи и выводы из работы; б) изложить в заключении новые идеи, которые не звучали в основной части публикации; в) упомянуть в заключении собственные смежные работы, разместить призыв к действию или описать дальнейшие этапы исследования по теме.

Список использованной литературы представляется на отдельной странице. Проверьте: а) все ли работы, упоминаемые в тексте лабораторного отчета, приведены в списке литературы; б) все ли работы, приведенные в списке литературы, упоминаются в тексте лабораторного отчета. Оптимальное число источников – 4–5. Не следует увлекаться цитированием, т.к. за «частью» цитат можно не различить мыслей автора [6].

Итак, научная статья должна быть законченным произведением, достоверно отражающим результаты оригинального исследования. В науке принято, чтобы элементы статьи по своему содержанию и структуре соответствовали определенным требованиям. При этом содержание статьи и логика изложения материала должны быть ясны не только читателю, но понятны и самому автору, иначе, следуя шуточному закону Уиттингтона, если автор пишет о том, чего не понимает, его работа будет понята только теми читателями, которые понимают в этом больше, чем он.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джуринский, К. Как написать научную статью? Советы начинающему автору / К. Джуринский // Компоненты и Технологии. – 2007. – № 70. – С. 24–26.
2. Казакова, А.Г. Научная статья как результат деятельности исследователя / А.Г. Казакова // Культура и образование. – 2013. – № 1(10). – С. 109–115.
3. Радаев, В.В. Как написать академический текст / В.В. Радаев // Вопросы образования. – 2011. – № 1. – С. 271–293.
4. Куликов, Л.В. Психологическое исследование: методические рекомендации по проведению / Л.В. Куликов. – СПб. : Речь, 2011. – 138 с.
5. Ершова, И.В. Научные публикации: императив творчества / И.В. Ершова // Методологические проблемы цивилистических исследований. – 2019. – № 1. – С. 45–63.
6. Сидоренко, И.Н. Научная статья: слагаемые качества / И.Н. Сидоренко // Гос. и муницип. упр. Ученые записки. – 2013. – № 4. – С. 8–14.

REFERENCES

1. Dzhurinskij, K. (2007). Kak napisat' nauchnuyu stat'yu? Sovety nachinayushchemu avtoru [How to write a scientific article? Tips for a novice author]. *Komponenty i Tekhnologii* [Components and Technologies], 70, 24–26. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Kazakova, A.G. (2013). Nauchnaya stat'ya kak rezul'tat deyatel'nosti issledovatelya [Scientific article as a result of the researcher's activity]. *Kul'tura i obrazovanie* [Culture and education], 1(10), 109–115. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Radaev, V.V. (2011). Kak napisat' akademicheskij tekst [How to write an academic text]. *Voprosy obrazovaniya* [Questions of education], 1, 271–293. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Kulikov, L.V. (2011). *Psihologicheskoe issledovanie: metodicheskie rekomendacii po provedeniyu*. Saint Petersburg: Rech'.
5. Ershova, I.V. (2019). Nauchnye publikacii: imperativ tvorchestva [Scientific publications: the imperative of creativit]. *Metodologicheskie problemy civilisticheskikh issledovanij* [Methodological problems of civil research], 1, 45–63. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Sidorenko, I.N. (2013). Nauchnaya stat'ya: slagaemye kachestva [Scientific article: terms of quality]. *Gosudarstvennoe i municipal'noe upravlenie. Uchenye zapiski* [State and municipal management. Scientific notes], 4, 8–14. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 13.01.2022

METHODOLOGICAL RECOMMENDATIONS FOR WRITING A SCIENTIFIC ARTICLE

I. ANDREYEVA

The article provides guidelines for writing a scientific article. General requirements for a scientific article are given, as well as recommendations for writing its structural parts.

Keywords: *scientific article, structure of a scientific article, requirements for a scientific article.*

УДК 378.242

ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ НАД СТАТЬЯМИ К ДИССЕРТАЦИИ

канд. техн. наук А.М. НИЯКОВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет)
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5106-6278>

В данной работе на основании личного практического опыта автора рассматриваются отдельные вопросы, связанные с написанием и опубликованием научных статей по теме диссертационного исследования. Даются ответы на наиболее актуальные вопросы соискателей и аспирантов, приведены практические рекомендации.

Ключевые слова: диссертация, научная статья, качество статьи, требования к публикациям, практические рекомендации.

В отличие от представленных выше, данная статья не претендует на академическое изложение методических принципов, а посвящена практическим вопросам написания научных статей по материалам диссертационного исследования и основывается на опыте автора, полученном при работе над кандидатской диссертацией.

Перед соискателем ученой степени в процессе выполнения исследований возникают вопросы, на которые нет прямых и ясных ответов в нормативных правовых актах. Именно на такие вопросы мы постараемся дать ответ в этой публикации.

Вопрос первый: какое минимальное количество статей необходимо опубликовать, чтобы выполнить существующие требования?

Формальный ответ на него содержится в Постановлении Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь (ВАК)¹, устанавливающим, что соискатель ученой степени кандидата наук должен опубликовать не менее трех статей в научных изданиях, входящих в перечень ВАК для опубликования результатов диссертационных исследований. При этом ВАК определила, что соискателем ученой степени должны быть опубликованы в научной периодике «...наиболее значимые результаты, полученные соискателем ученой степени, требующие развернутого изложения и аргументации»². Совершенно ясно, что трех статей для этого будет недостаточно. Сколько же тогда их должно быть и что следует отнести к «основным положениям», подлежащим опубликованию?

В конце любой главы диссертации размещаются выводы, каждый из которых должен содержать ссылку в квадратных скобках на собственные публикации соискателя, где этот вывод был обоснован и зафиксирован.

Выглядеть это может следующим образом [1]:

«1. На основе разработанной в главе 3 математической модели путем численного моделирования тепловой обработки однородных бетонных 3d-изделий кубической формы с размерами ребер 0,1 м, 0,2 м, 0,3 м и 0,4 м показано, что при заданном режиме тепловой обработки вида «подъем температуры – изотермическая выдержка – снижение температуры» в выделенных точках изделий наблюдается превышение температуры по сравнению с заданной температурой изотермической выдержки, обусловленное поступлением теплоты гидратации. Это превышение в пределах времени изотермической выдержки изменяется по нелинейному закону и при температуре в пространственной области нагревателя 85 °С составляет 2,3–5,73 °С, увеличиваясь по мере роста объема изделия, асимптотически приближаясь к некоторому постоянному значению [4-А, 10-А] ...».

Другой частью текста диссертации, в котором придется делать подобные ссылки на собственные работы соискателя, будет «Заключение», отражающее основные научные результаты диссертационного исследования. Кроме того, выносимые на защиту положения со ссылками на статьи автора, в которых они были опубликованы, должны быть приведены в автореферате диссертации.

Элементарные расчеты показывают, что при наличии в диссертационном исследовании, например, четырех глав, трех-четырёх выводов по каждой главе, целиком отражающих выносимые на защиту положения, общее число статей, необходимых для опубликования научных результатов, составит не менее 12, из которых хотя бы три должны быть размещены в изданиях, входящих в перечень ВАК. Обычно диссертант вспоминает о своих публикациях в самом конце пути, когда оформляет текст диссертации и работает над ее авторефератом. Тогда зачастую и обнаруживается, что имеющиеся у него публикации не позволяют «покрыть» все выводы по главам диссертации и все основные ее результаты, не говоря о положениях, выносимых на защиту.

¹ Положение о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (в ред. Указов Президента Республики Беларусь от 01.12.2011 № 561, от 30.12.2011 № 621, от 16.12.2013 № 560). URL: <https://imb.by/abiturientu-aspirantura/87-normativno-pravovye-akty.html>

² Инструкция о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации) на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, автореферата и публикации по теме диссертации (в ред. постановления ВАК от 30.06.2012 № 5). URL: <https://vak.gov.by/On-Approval-of-Instruction>

Таким образом, статьи не могут писаться «просто так», «чтобы были», они должны быть увязаны со структурой текста диссертации, как в содержательном, так и в количественном смысле. План своей публикационной активности соискателю следует разработать, по крайней мере, по итогам написания первой главы исследования.

Вопрос второй: в каких научных изданиях следует публиковать результаты диссертационного исследования?

Часть ответа на этот вопрос состоит в том, что не менее трех статей должны быть опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК. Остальные должны быть опубликованы в прочих рецензируемых журналах, материалах конференций и научных сборниках. Зачастую диссертант и его научный руководитель не задумываются, соответствует ли то или иное издание предъявляемым требованиям. При этом важно обратить внимание на следующее обстоятельство: не все издания, включенные в перечень ВАК, могут рассматриваться в таком качестве применительно к научной специальности, по которой диссертант выполняет свое исследование.

Научные журналы, включенные в перечень ВАК, подразделяются по научным направлениям в зависимости от отраслей науки, а также номенклатуры научных специальностей, результаты исследований по которым они публикуют. Предположим, работа соискателя посвящена вопросам устойчивости строительных конструкций и защищаться он будет по специальности 05.23.17 «Строительная механика», относящейся к группе «Строительство и архитектура» и отрасли технических наук. Пусть, например, диссертант предложил математическую модель и методы ее численного решения, а также предназначенный для этого программный продукт. Предположим, что полученные результаты он разместил в научных журналах, включенных в перечень ВАК, но публикующих материалы диссертационных исследований по математике, физике и программированию. Несмотря на то, что эти журналы относятся к перечню ВАК, публикации в них не могут быть в рассматриваемом случае зачтены в число «ваkových», поскольку отрасль науки или научная специальность отличаются от тех, по которым предполагается защита диссертации.

Чтобы не ошибиться с выбором научного журнала, необходимо тщательно изучить паспорт своей научной специальности, прописанную в нем область исследований и установленные разграничения со смежными специальностями. Иногда выбор «правильного» журнала может вызвать затруднения, т.к. зачастую они разделены между собой в Перечне ВАК не по научным специальностям или группам научных специальностей, а по так называемым «научным направлениям», состав которых не всегда может быть однозначно определен.

Важно отметить, что соискателю нужно стремиться к тому, чтобы часть его работ была опубликована в научных изданиях, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science.

Вопрос третий: на что надо обратить внимание при написании научной статьи?

ВАК в своем Постановлении [2] определил, что объем научной статьи по теме диссертации должен составлять не менее 0,35 авторского листа (14 000 печатных знаков, включая пробелы между словами, знаки препинания, цифры и др.). Однако это Постановление допускает, что если правилами, установленными для авторов соответствующих печатных изданий, предъявляются иные требования к объему статьи, то можно следовать им. Вместе с тем, чтобы при рассмотрении диссертации в ВАК не возникли вопросы, то пожелания ВАК относительно размера публикации следует, на наш субъективный взгляд, полагать минимально допустимыми. При этом объем рисунков и таблиц, а также список литературы следует исключить из числа 14 000 печатных знаков, пусть даже в процитированном выше Постановлении ВАК об этом ничего и не сказано. Как говорится, «береженого Бог бережет!»

При написании статьи особое внимание следует обратить и на содержание ее обязательных разделов. Например, в основной части статьи в обязательном порядке подробно описываются методика, аппаратура, материалы и (что особенно важно) цель, объект и предмет исследования, результатам которого посвящена статья. И тут важно не допустить ошибки: цель, объект и предмет исследования, указанные в статье, должны полностью соответствовать области исследований, зафиксированной в паспорте специальности, по которой будет осуществляться защита диссертации.

При написании соискателями ученой степени научных статей большое значение также имеет ясное формулирование завершающих выводов. Безусловно, что они не обязательно должны точь-в-точь повторять или копировать формулировки выводов, размещенных в тексте диссертации, но в значительной мере должны с ними «пересекаться». Что же должно в них содержаться? На наш взгляд, все то, что подтверждает научную новизну исследования и обосновывает положения, выносимые на защиту: новые научные результаты, новые зависимости, методики, факты.

Явно неудачными, по нашему мнению, будут, к примеру, следующие формулировки: «Выполнены исследования влияния скорости потока на коэффициенты теплоотдачи на границе раздела сред», «Получены новые результаты, свидетельствующие о характере процессов теплообмена», «Разработана новая методика расчета удельного энергопотребления, основанная на термодинамических показателях...» и т.п.

Что не так в этих формулировках? Они декларативны. В них не содержатся конкретные указания на объект и предмет исследований, рассмотренный интервал значений и соответствующие ему результаты, не раскрыта сущность разработанной методики.

С учетом этих требований формулировка первых двух тезисов выводов из приведенного выше примера должна быть такой: «Для контактного насадочного теплообменного аппарата системы кондиционирования воздуха общественного здания с насадкой из полых полиэтиленовых цилиндров выполнены исследования влияния скоростей воздушного потока на коэффициент теплоотдачи на границе раздела сред. Получены новые результаты, свидетельствующие, что в диапазоне скоростей от 0,5 до 2 м/с и характерном размере насадки 0,02 м при возрастании скорости потока от 0,5 до 1 м/с величина коэффициента теплоотдачи возрастает от 20

до 50 Вт/(м²·К), подчиняясь закону, близкому к линейному, а затем остается практически постоянной, асимптотически приближаясь к максимальному значению, равному 52 Вт/(м²·К)». (Эта формулировка здесь приводится в качестве примера и не является цитированием какой-либо научной работы).

Третий же тезис должен быть сформулирован так, чтобы в нем содержались указания, позволяющие отличить разработанную соискателем методику от существующих прочих. Например: «Разработана новая методика оценки энергоэффективности насадочных теплообменных аппаратов, применяемых в системах кондиционирования воздуха общественных зданий, основанная на использовании величины полезной эксергии потока воздуха, отличающаяся тем, что...» и т.д.

К слову, подобный тщательный подход к проработке формулировок выводов, научной новизны, выносимых на защиту положений должен быть применен и при написании текста диссертации. Только в этом случае устанавливается однозначная и ясная связь публикаций с целями и задачами диссертации, объектом и предметом диссертационного исследования, становится ясным, какие именно основные положения научной работы опубликованы в печати.

На что еще обратить внимание?

Диссертационное исследование соискателя ученой степени не возникает на пустом месте. Как правило, оно выполняется в русле работ соответствующей научной школы. Поэтому при написании текстов диссертации и научных публикаций важно показать свою причастность к этой научной школе, другим диссертационным исследованиям, выполненным под руководством вашего научного руководителя. Такая связь может быть установлена ссылками на соответствующие работы этих авторов. Подобный подход будет демонстрировать не только уважение к коллегам по науке, но и показывать системное единство вашей работы с другими исследованиями в аналогичной или в смежных областях научной специальности или научного направления. Это, безусловно, повысит качество работы, позволит сформировать правильное к ней отношение экспертного сообщества.

С особой осторожностью соискателю следует подходить к выбору соавторов своих публикаций. Дело в том, что соавторы впоследствии не смогут исполнять роли экспертов по вашей диссертации в научном собрании, оппонирующей организации, совете по защите, быть оппонентами при ее защите. Таким образом, по крайней мере, семь известных в вашей научной области ученых, которые должны в будущем исполнить указанные роли, не должны быть в числе ваших соавторов. Не говоря о том, что в обязательном порядке должны быть публикации, написанные соискателем единолично (правда, их обязательное число нормативными документами не установлено).

Необходимо также иметь в виду, что ВАК принимает в расчет только те публикации, которые были опубликованы соискателем до даты написания заявления о приеме диссертации научным собранием для предварительной экспертизы. Все материалы, опубликованные соискателем после этой даты, не могут быть отнесены к публикациям по теме диссертационного исследования и не должны указываться ни в тексте диссертации, ни в автореферате. Кстати, это частая ошибка, когда диссертант по итогам предварительной экспертизы, с учетом состоявшегося обсуждения и замечаний, пытается расширить число публикаций или дополнить их, а в итоге ВАК отказывает ему в присуждении ученой степени из-за подобных формальных нарушений.

В завершение еще одно пожелание.

Перед защитой диссертации соискателю, чтобы продемонстрировать свое «научное лицо», желательно навести порядок в личных аккаунтах в наукометрических базах, таких как ORCID, Scopus, Web of Science, РИНЦ, Google Scholar, чтобы в них были отражены все научные публикации, количество цитирований и их индексы. Это та «одежка», по которой встречают.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нияковский, А.М. Научно-методическое обеспечение энергоэффективных режимов теплотехнологического оборудования для тепловой обработки бетонных изделий : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.04 / А.М. Нияковский. – Минск, 2020. – 247 л.

REFERENCES

1. Niyakovskij, A.M. (2020). *Nauchno-metodicheskoe obespechenie energoeffektivnyh rezhimov teplotekhnologicheskogo oborudovaniya dlya teplovoj obrabotki betonnyh izdelij* [Scientific and methodological support of energy-efficient modes of heat-technological equipment for heat treatment of concrete products]. Minsk. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 12.01.2022

FROM THE EXPERIENCE OF WORKING ON ARTICLES FOR THE DISSERTATION

A. NIYAKOVSKII

In this paper, based on the personal practical experience of the author, some issues related to the writing and publication of scientific articles on the topic of dissertation research are considered. Answers to the most pressing questions of graduate students are given, practical recommendations are given.

Keywords: *dissertation, scientific article, article quality, publication requirements, practical recommendations.*

УДК 001.89:004.9

**СОВРЕМЕННАЯ ЦИФРОВАЯ НАУЧНАЯ СРЕДА:
ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТЫ УЧЕНОГО****М.Н. ШУХАНКОВА***(Полоцкий государственный университет)*

Сегодня, в век четвертой цифровой революции, век дигитализации многих сфер жизни в целом, науки и образования в частности, молодые ученые научно-исследовательских организаций и высших учебных заведений сталкиваются со сложностями при подготовке публикаций и в продвижении результатов своих исследований. В процессе цифровой трансформации возникли новые направления работы, напрямую связанные с различными образовательными и научными платформами, цифровизацией исследований и продвижением результатов в мировое научное пространство. Задачи научных библиотек – помочь найти ответы на вопросы, касающиеся повышения публикационной активности, продвижения публикаций в мировые наукометрические системы и базы данных.

Ключевые слова: *ученые, информационные ресурсы, научные библиотеки, ресурсы библиотек, авторские идентификаторы, наукометрические база данных, текстовые заимствования.*

Научная библиотека Полоцкого государственного университета (далее – НБ ПГУ) нашла свою нишу в цифровом сегменте университета и приоритетом в работе выбрала такие направления, как создание и продвижение ресурсов открытого доступа, работа в наукометрических системах и аналитика, продвижение публикаций преподавателей университета, корректировка профилей авторов и университета в системах цитирования, участие библиотеки в улучшении показателей университета в мировых рейтинговых системах, ориентир на удаленный доступ к ресурсам. НБ ПГУ, поддерживая инициативу и разделяя принципы открытой науки, систематически проводит циклы мероприятий в помощь молодому ученому, которые призваны показать новые сервисы и дать новые точки роста начинающему исследователю. Цели и задачи таких мероприятий – формирование системы компетенций в области академического письма у научных работников, ознакомление с современными подходами к функционированию и развитию открытой науки, а также получение практических навыков в целях повышения публикационной активности по созданию авторских профилей ученого и т.д.

В декабре 2021 г. библиотека провела очередной научно-практический семинар для молодых ученых, где освещались такие вопросы, как открытая наука, международные и национальные агрегаторы открытого доступа, наукометрия, инструменты ученого, выбор научных журналов для публикаций, особенности написания научной статьи; авторские идентификаторы и др.

Ресурсы научной библиотеки Полоцкого государственного университета. Для обеспечения учебной и научно-исследовательской деятельности сообщества университета (преподавателей, сотрудников, студентов, аспирантов) НБ ПГУ предоставляет свободный доступ к информации через систему электронных каталогов, организует доступ к собственным электронным ресурсам, электронным-библиотечным системам (ЭБС), лицензионным базам данных. Базы данных представлены реферативными, библиографическими, полнотекстовыми ресурсами, ресурсами смешанного характера; по наполнению – тематическими и политематическими базами, правовыми и др.

Электронный каталог НБ ПГУ включает библиографическую информацию о книгах, газетах, журналах, статьях из периодических изданиях, доступен читателям как в локальной сети библиотеки, так и через сеть Интернет (<http://elib.psu.by:8009/marcweb2/>). Поиск необходимой информации можно осуществлять без авторизации, но если пользователь желает получить более полную информацию о найденных источниках, то ее следует пройти. Авторизованный пользователь сможет посмотреть, где находится необходимый ему документ, в каком количестве, отобрать для заказа, познакомиться с содержанием, а учебные пособия, изданные в издательстве Полоцкого государственного университета, сможет прочесть, скачать.

Электронная библиотека Полоцкого государственного университета (<https://elib.psu.by/>) обеспечивает размещение, хранение, свободный сетевой доступ к авторским произведениям в цифровых форматах, созданных сотрудниками университета и их партнерами, аспирантами, магистрантами и студентами. В свободном доступе представлены периодические издания Полоцкого государственного университета, материалы научных конференций, авторские научные произведения сотрудников, аспирантов, магистрантов, студентов.

На протяжении нескольких лет НБ ПГУ предоставляет свободный доступ для всех пользователей университета к электронно-библиотечной системе «Университетская библиотека online» – это электронная библиотека со множеством сервисов, расширяющих границы информационного пространства вуза и обеспечивающая доступ пользователей к наиболее востребованным материалам учебной и научной литературы по всем отраслям знаний от ведущих российских издательств. Ресурс содержит учебники, учебные пособия, монографии, периодические

издания, справочники, словари, энциклопедии, художественную литературу и др. Каталог изданий систематически пополняется новой актуальной литературой.

НБ ПГУ – участник Консорциума сетевых электронных библиотек. В рамках сотрудничества Полоцкий государственный университет получил доступ к учебной и научной литературе других вузов – участников проекта 326 вузов участников на декабрь 2021 г.) – более 44 000 изданий для преподавателей и студентов по всем отраслям знаний. Сетевая электронная библиотека (далее – СЭБ) обновляется ежедневно. Консорциум СЭБ реализует идею взаимного доступа и консолидации ресурсов на платформе, лидирующей в России по охвату аудитории и размерам коллекций электронно-библиотечной системы «Лань». Электронно-библиотечная система «Лань» – это ресурс, включающий в себя электронные версии книг ведущих издательств учебной и научной литературы (в т.ч. университетских издательств) и электронные версии периодических изданий по различным областям знаний.

Для чтения документов необходимо пройти первичную регистрацию на сайте ЭБС «Лань» с любого компьютера университета, имеющего выход в Интернет. Далее через личный логин и пароль каждый пользователь может авторизоваться с домашнего компьютера. В этом случае все сервисы ЭБС будут доступны при работе из дома.

Платформу eLIBRARY.RU мы используем как читатели, издатели и авторы, т.е. используем все сервисы, предоставляемые Научной электронной библиотекой. Практически для всех категорий пользователей платформа eLIBRARY.RU – важнейший инструмент научной работы, анализа и образования, установления научной коммуникации и кооперации. Основу фондов составляют научные журналы, охватывающие все отрасли знания; кроме журналов имеются книги, диссертации, отчеты, патенты и др. НБ ПГУ имеет подписку на коллекцию из 22 российских журналов в полнотекстовом электронном виде. Доступ к фондам свободный после регистрации. Особенностью библиотеки является то, что в нее встроен Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), который позволяет оценить научную значимость конкретного журнала, статьи и автора. Это позволяет пользователю оценить качество найденной информации.

Информационно-поисковая система «ЭТАЛОН» представляет собой совокупность банков данных «Законодательство Республики Беларусь», «Решения органов местного управления и самоуправления», «Международные договоры». Данная правовая система обеспечивает доступ к эталонному банку данных правовой информации Республики Беларусь и доступна из локальной сети библиотеки и университета.

ИПС «Стандарт 3.5» – официальная информационная полнотекстовая система, созданная на базе электронных информационных ресурсов Национального фонда технических нормативных правовых актов Республики Беларусь, содержит полные тексты технических нормативных актов Республики Беларусь:

- документы технического законодательства Таможенного союза;
- технические регламенты государств-участников СНГ;
- документы международных, региональных организаций по стандартизации;
- документы технического законодательства ЕС.

Также содержит библиографическую информацию о стандартах международных, европейских организаций по стандартизации (ISO, IEC, CEN, CENELEC, ETSI, EA). Доступ к текстам документов предоставляется из локальной сети библиотеки и университета.

Информационно-поисковая система «СтройДоконлайн» предоставляет доступ через Интернет (по логину/пароллю) к текстам ТНПА в области архитектурной, градостроительной и строительной деятельности и содержит:

- полную базу национальных технических нормативных правовых актов в области архитектуры и строительства; межгосударственные стандарты в области архитектуры и строительства, действующие на территории республики;
- официальные документы Минстройархитектуры в области технического нормирования, стандартизации и сертификации (приказы, письма).

НБ ПГУ широко использует возможности опробовать предлагаемые агрегаторами ресурсы посредством тестового доступа. Его наличие, пусть и кратковременное, позволяет довольно заметно расширить информационные возможности библиотеки.

Репозиторий Полоцкого государственного университета – авторитетный научный архив, который предоставляет автору технологию самоархивирования и оперативного размещения своих научных трудов или информацию о научных достижениях в открытом доступе для информирования широкой научной общественности. Это инструмент аналитической обработки и оценки деятельности университета на международном, национальном и локальном уровнях, инструмент оценки качества создаваемых учебных и научных информационных ресурсов. Репозиторий ПГУ функционирует с июля 2013 г., количество документов в Репозитории с каждым годом увеличивается и на 15.12.2021 г. составляет 22 534. Созданы авторские коллекции ведущих ученых вуза. Наибольшей популярностью пользуются научные коллекции открытого доступа: материалы конференций, статьи из «Вестника Полоцкого государственного университета». Библиотека продолжает активные действия по продвижению журнала «Вестник Полоцкого государственного университета» в научно-информационные системы. Завершена работа по размещению архива журнала в Российский Индекс Научного Цитирования (РИНЦ).

Договор, заключенный между Научной электронной библиотекой eLIBRARY.RU и Полоцким государственным университетом, предусматривает размещение библиографического описания статей, аннотаций, списков пристатейной библиографии и полных текстов статей в открытом доступе, что способствует повышению цитируемости статей журнала и, как следствие, рейтинга ученых университета, востребованности издания в профессиональном сообществе. На сегодня в РИНЦ размещены все серии журнала «Вестник Полоцкого государственного университета». С Научной электронной библиотекой eLIBRARY.RU также заключен Лицензионный договор на размещение трудов конференций, прошедших на базе Полоцкого государственного университета.

На сайте библиотеки имеется раздел «Ресурсы», в котором отображаются все вышеперечисленные информационно-поисковые системы, которые помогут исследователям разных областей найти необходимую информацию и получить доступ к мировым информационным ресурсам.

Выбор публикационной стратегии. Каждому молодому ученому, чтобы выполнить качественное исследование и опубликовать статью в достойном журнале, необходима публикационная стратегия, которая может включать:

- выбор перспективного направления научных исследований;
- поиск авторитетных и актуальных публикаций по своей тематике и их цитирование;
- партнерство и соавторство с исследователями из других стран;
- выбор качественного журнала для опубликования результатов работы (на цитируемость может также оказать влияние размещение публикации в узкоспециализированном журнале);
- качественную работу над элементами и структурой научных статей (включая название, аннотацию и ключевые слова), их оформление согласно стандартам международных журналов;
- использование возможностей открытой науки;
- создание и поддержку в актуальном состоянии своих авторских профилей;
- публикацию статей в журналах открытого доступа, размещение публикаций в репозитории университета (если это допускается политикой журнала).

Преимущества публикации научных статей в открытом доступе – это повышение прозрачности научной среды, увеличение скорости распространения информации, доступности и более широкое распространение научных результатов и достижений; популяризация науки и возможности использования результатов исследований в коммерческих целях, а также снижение рисков проведения дублирующих исследований. Т.е. сами исследователи получают больше выгоды от того, что результаты их работы располагаются в открытом доступе, – в таком случае их статью быстрее найдут, прочитают гораздо больше людей. Малоэффективно публиковаться в журналах, участвовать в конференциях, сборники работ которых НЕ размещаются в открытом доступе в сети Интернет и/или НЕ индексируются. Необходимо участвовать в жизни профессиональных сообществ по своей/смежной тематике как в реальной жизни (Конференции и семинары), так и в виртуальной – группы в социальных сетях «общего» и «специального» назначения и делиться там своими результатами работы.

Перед автором научной статьи возникает проблема выбора издания. Один из главных критериев выбора – индексирование журнала в наукометрических базах данных, таких как Scopus и Web of Science Core Collection. Это реферативные универсальные по тематике базы данных, включающие метаданные и аннотации на статьи научных журналов, материалы конференций, серийные книжные издания с пристатейными библиографическими списками. Обе базы данных оценивают журналы на предмет стандартов редакционного процесса, представления веб-сайтов, редакционной и этической политики и поведения, индексирования на других платформах информационных агрегаторов. Кроме того, оценивается цитирование журнала для определения его значимости в данной области знаний. Все журналы в Web of Science и Scopus приписаны к тематическим категориям (научным областям). В Web of Science их около 250, в Scopus – около 320, при этом классификаторы баз по некоторым позициям не совпадают. Журналы в пределах одной тематической категории ранжируются по величине импакт-фактора¹ или индикатора SJR², в результате чего попадают в тот или иной квартиль. Вычисление квартилей основывается на числе ссылок на конкретную статью в других работах. В итоге индексируемому журналу присваивается одна из четырех категорий – от Q-1 (наивысшая) до Q-4 (низшая).

БД Scopus начала свою работу в ноябре 2004 г. На тот момент база данных включала в себя контент из 14 200 журналов. В текущем году индексируется более 25 000 наименований. Контент Scopus разделен на четыре широких предметных кластера: физические науки – 28%; социальные и гуманитарные науки – 26,2%; науки о жизни – 15,4 и науки о здоровье – 30,4%. Издания могут относиться к более чем одной предметной

¹ Импакт-фактор (IF) WoS – среднее число цитирований данного журнала. При подсчете используется двухлетнее публикационное окно и однолетнее окно цитирования.

² SJR Scopus учитывает не только общее количество цитирований, но и влияние каждой ссылки. Взвешенная оценка цитирования зависит от отрасли знаний и престижности цитирующего периодического издания. При расчете устанавливается окно цитирования 3 года.

области. Пополняется база источниками 2–3 раза в год. Индексирование материалов конференций сосредоточено в первую очередь на трех предметных областях: инженерное дело, информатика и некоторые области физики.

Scopus предоставляет бесплатный сервис по поиску источников и проверке профиля автора на сайте <https://www.scopus.com>. Профиль автора создается автоматически, если есть хотя бы одна публикация. На русскоязычном сайте издательства Elsevier <https://elsevierscience.ru> (компания, которой принадлежит БД Scopus) можно скачать списки книг, российских журналов, индексируемых в Scopus, а также тех, индексация которых прекращена.

Web of Science – это платформа с разными базами данных. Главной коллекцией считается Web of Science Core Collection, включающая три основных индекса цитирования журналов (SCIE, SSCI, A&HCI) и четвертый ESCI, относительно новый, а также индексы цитирования материалов конференции (CPCI) и книг Book Citation Index (BKCI). Индекс Science Citation Index Expanded (SCIE) включает 9200 журналов по естественным, техническим, медицинским наукам. Индекс Social Science Citation Index (SSCI) насчитывает более 3400 самых влиятельных журналов мира по социальным наукам: экономике, менеджменту, истории, праву, политологии. Индекс Arts & Humanities Citation Index (AHCI) состоит из 1800 журналов по гуманитарным наукам: искусствоведению, литературоведению, религиоведению, истории. Для журналов, входящих в AHCI, импакт-фактор не рассчитывается в виду особенностей предметной области. Индекс Emerging Sources Citation Index (ESCI) (применяется с 2015 г.) на сегодня насчитывает около 7 800 журналов по всем отраслям знания. В этот индекс входят журналы, претендующие на включение в основные журнальные индексы Web of Science CC, либо те, которые перестали соответствовать условиям ключевых индексов. Импакт-фактор для данного индекса также не рассчитывается.

Web of Science на странице сайта (<https://mjl.clarivate.com/>) предоставляет бесплатный инструмент по поиску журналов Master Journal List. Журналы систематизированы по тематическим категориям. Поиск возможен по ISSN, названию, стране издателя периодического издания. Для просмотра более детальной информации о журнале необходимо зарегистрироваться в системе.

НБ ПГУ занимается мониторингом публикационной активности ученых Полоцкого государственного университета, а также исследует профили авторов в Scopus и Web of Science. В библиотеке создана консультативная служба по наукометрии, которая оказывает помощь пользователям по созданию и корректировке авторских профилей: Researcher ID (Web of Science), AuthorIdentifier (Scopus), ORCID, SCIENCE INDEX для авторов (РИНЦ).

Идентификатор ORCID в современной научной коммуникации. В современной цифровой научной среде существуют различные системы уникальных идентификаторов ученых – ID, которые позволяют установить соответствие между автором и результатами его работы, упростить обработку и хранение данных, улучшить видимость публикаций в глобальной сети.

Авторские идентификаторы – это уникальные коды, присвоенные ученому в различных системах и базах данных, предназначенные для точного определения авторства публикаций.

Широко используемые идентификаторы – ORCID и ResearcherID – требуют персональной регистрации, а ScopusAuthorID присваивается автоматически, когда у автора появляется первая статья в Scopus [2].

ResearcherID – идентификатор, который связывает автора с публикациями в Web of Science. Для получения ResearcherID необходимо зарегистрироваться в системе Publons, которая является платформой для учета публикаций, показателей цитирования, рецензий и редактирования журналов. Система позволяет импортировать публикации в профиль автора из Web of Science, а также загружать описания публикаций, не индексируемых в этой базе данных.

Открытый идентификатор автора и исследователя ORCID (Open Researcher and Contributor ID) — это цифровой код, который дополняет фамилию ученого и позволяет объединить в одном профиле данные о его публикациях, аффилиациях, исследованиях и научных процессах, в которых он участвует³.

ORCID – международный некоммерческий проект, который помогает решить следующие проблемы идентификации:

- ошибочное или неправильное написание ФИО ученого;
- вариации транслитерации;
- неправильный перевод ФИО на другие языки;
- одинаковые фамилии ученых.

ORCID интегрирован во многие международные наукометрические базы данных, платформы для электронных журналов, различные системы идентификации и сбора, хранения и экспортирования метаданных о научной деятельности специалистов и применяется для функциональной совместимости, согласования личности отдельного ученого с его научной деятельностью. Чтобы начать использовать ORCID, необходимо зарегистрироваться на официальном сайте <http://orcid.org/> и добавить личную информацию в профиль.³

Сайт поддерживает разные языки. В регистрационной форме заполняются соответствующие поля: имя, фамилия, электронный адрес, пароль, и устанавливается один из трех уровней приватности данных. После успешного прохождения процедуры регистрации ученому присваивается 16-значный идентификатор в виде URL: <http://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>, который отображается в левой панели учетной записи [2].

³ Информация об ORCID [Электронный ресурс] // ORCID в России. URL: <https://www.orcid-ru.org/>

В личный профиль ORCID нужно внести персональные данные, место работы, образование, приглашенные должности, гранты, информацию об исследовательской деятельности, ссылки на другие профили, страницы в научных социальных сетях и список публикаций. Добавление информации о публикациях возможно автоматически и вручную.

ORCID сотрудничает со многими организациями и существует возможность импортировать публикации из реестров данных других систем. В большинстве случаев предусмотрен настраиваемый обмен данными между профилями идентификаторов, загрузка сведений из индексов цитирования, выгрузка в общепринятые библиографические форматы.

Реестром уникальных идентификаторов ORCID пользуются Scopus, Web of Science, CrossRef. Из всех мощников автоматического импорта статей выделяется Crossref Metadata Search, который позволяет искать и добавлять работы по идентификатору цифрового объекта DOI или названию [2]. Если редакция регистрирует DOI для статей, то эти статьи автоматически попадают в профиль автора ORCID.

Если у автора есть хотя бы одна публикация, отраженная в Scopus, можно связать эту страницу с личным ORCID ID. Записи в ORCID хорошо синхронизируются с записями в базе данных Scopus – можно перенести все публикации автора из Scopus в ORCID, указав номер авторского профиля ScopusAuthor ID. В случае если работы автора в Scopus присоединены к нескольким профилям, то при включении их в ORCID служба технической поддержки Scopus отредактирует профиль автора в базе данных [1].

Существуют и другие способы создания связи между учетной записью ORCID и другими веб-сайтами. Главная идея состоит в том, чтобы связать вместе идентификаторы и профили и свободно переносить публикации из одной системы в другую. В личном кабинете ORCID существует возможность обновления персональной информации [2].

ORCID ID – это своего рода визитная карточка. Ученому он упрощает согласование сведений об авторе при работе с издателями, научным сообществом. Редакционная политика многих высокорейтинговых журналов предусматривает указание авторского идентификатора, чаще всего ORCID, вместо традиционных сведений об ученом. У редакции в этом случае есть возможность связаться с автором и увидеть все его публикации. Принято указывать ORCID ID при подаче документов на гранты и в прочих исследовательских процессах. Научно-исследовательские учреждения, фонды, научные сообщества, издательства, библиотеки с помощью ORCID автора могут быстро получить актуальную информацию о его научной деятельности.

Таким образом, очевидна важность наличия и корректности заполнения профилей авторских идентификаторов. Это быстрый и простой способ продвижения публикаций в мировом научном пространстве, улучшения их видимости и повышения цитируемости [2].

Обнаружение текстовых заимствований системой «Антиплагиат.Вуз». В 2020 г. Полоцкий государственный университет заключил договор с компанией «Антиплагиат» на оказание услуг для обнаружения текстовых заимствований в учебных, научных, а также других авторских материалах. Был разработан «Регламент использования системы Антиплагиат.Вуз» – своеобразная технологическая карта, в которой устанавливается порядок осуществления проверки текстовых документов, являющихся результатом учебной и научной деятельности в Полоцком государственном университете. Обозначены цели проверки как повышение качества организации образовательного процесса и уровня подготовки специалистов, как главного фактора обеспечения конкурентоспособности университета, а также обеспечения высокого качества публикуемого университетом научного контента и повышения научного уровня и качества диссертационных работ. Приведен общий порядок использования системы, обозначены лица, осуществляющие координацию и контроль работы по проведению проверок, условия проверки и требования к представляемым к проверке документам.

Проверка в системе «Антиплагиат.Вуз» осуществляется по следующим модулям (коллекциям): eLIBRARY.RU; Диссертации РГБ, НББ; Интернет Плюс; ИПС «Гарант», «Адилет»; Кольцо ВУЗов; Медицина; Модуль поиска «БГУ»; Патенты СССР, РФ, СНГ; Переводные заимствования (RuEn); Переводные заимствования по eLIBRARY.RU (EnRu); Переводные заимствования по интернету (EnRu); Переводные заимствования; Перефразирование по eLIBRARY.RU; Перефразирование по Интернету; Сводная коллекция ЭБС; СМИ России и СНГ; Цитирование; Шаблонные фразы; Библиография. Сводная коллекция от компании «Антиплагиат» – это стандарт качества проверок, которая отличается ее от множества других систем по проверке текстов на уникальность.

Алгоритм системы «Антиплагиат.Вуз» предоставляет информацию об общем уровне уникальности проверяемого документа. При нахождении сходных (перефразированных) или идентичных отрывков текста алгоритм помечает эти отрывки цветным маркером, указывая после общего анализа документа интерактивный список источников [3].

В качестве основного инструмента анализа документа в системе «Антиплагиат» предлагается полный отчет о проверке на заимствования, содержащий ранжированный список обнаруженных источников заимствований, и полный текст проверяемого документа, в котором особым образом (цветным маркером) выделены заимствованные, цитируемые и самоцитируемые фрагменты текста. Полный отчет позволяет исследовать и квалифицировать каждый выделенный фрагмент текста. С помощью инструментов редактирования полного отчета отдельные источники заимствования могут быть переквалифицированы в цитирование, самоцитирование или отключены с соответствующим комментарием эксперта. Наличие экспертизы полного отчета о проверке обязательна [5; 6].

На странице с результатами проверки кроме определения доли оригинальности текста алгоритм системы предоставляет информацию о текстовых метриках проверяемого документа: доле научной лексики (отношение слов и словосочетаний, входящих в «словарь научных терминов и конструкций», к общему количеству слов и словосочетаний в проверяемом тексте); доле общей лексики (доля слов и словосочетаний текста за вычетом доли научной лексики); наличии аннотации; наличии введения; наличии методов исследования; наличии результатов исследования; наличии выводов исследования; наличии библиографии; оценке связанности текста (характеризуется синтаксической и семантической связанностью предложений)⁴.

Уникальные технологии, применяемые системой «Антиплагиат.Вуз» позволяют выявлять попытки маскировки заимствований. Среди них замена символов разных алфавитов, вставка невидимого текста и т.д. Зачастую авторы применяют данные попытки для повышения уникальности текста. Обнаружив такие попытки, система выдаст предупреждение и укажет, в каких местах документа были совершены обходы [7].

Опыт применения системы «Антиплагиат.Вуз» показал, что оценить качество и оригинальность квалификационной или научной работы только по количественным показателям является формальным подходом к проверке [4]. Результаты проверки носят *предварительный характер*, а для получения окончательных результатов необходим анализ полного отчета, изучения списка заимствованных источников, оценка их правомерности. Выводы о добросовестности и корректности заимствований, в т.ч. самоцитирования в проверяемом документе, «должен делать эксперт путем анализа полного отчета, списка источников заимствования, исходя из жанра проверяемого документа и установленных к нему в организации требований. И именно эксперт должен принимать решение, является ли каждый заимствованный фрагмент текста правомерным заимствованием. Перекладывание ответственности при принятии решения с человека на систему «Антиплагиат», например, путем ссылки на тот или иной уровень заимствованного текста, выявленный системой, является неэтичной практикой» [4; 8].

Обобщая все полученные знания на семинарах, проводимых библиотекой, можно выделить несколько основных этапов деятельности молодого ученого:

- отслеживание значимости исследования; мониторинг глобальных научных трендов;
- сравнение и подборка журналов для публикации своей статьи;
- создание и наполнение своего авторского профиля ученого. Интеграция профилей с системой идентификаторов ORCID;
- самоархивирование в репозитории университета;
- открытые публикации статей в международных журналах с высоким импакт-фактором;
- международное соавторство;
- коммуникация в научных социальных сетях (Mendeley Web, ResearchGate, Academia.edu и др.);
- усовершенствование знаний иностранных языков.

Все эти факторы в итоге приведут молодого ученого к увеличению цитируемости его публикации (через индексирование в научных поисковых системах) и, как следствие, росту абсолютных показателей: научной производительности, научного авторитета, научной эффективности. Что касается университета, то посредством деятельности такого ученого повышаются конкурентоспособность исследований вуза, ценность и результативность науки в целом.

Таким образом, разного рода и вида программы обучения молодых ученых предназначены для актуализации теоретических знаний и совершенствования практических навыков научных сотрудников университета, преподавателей, магистрантов, аспирантов. Знания, полученные молодыми учеными, эффективно применяются ими в научной деятельности. Изучение инструментов, сервисов, доступа к публикациям лучших мировых научных платформ благотворно влияет на уровень выполняемых в университете исследований. Эти изменения находят отражение в характеристиках цитируемости университетских публикаций.

Все материалы подготовлены нашими докладчиками с целью помочь молодым ученым в научно-исследовательской деятельности. Усвоенная информация будет полезна при написании и оформлении научной статьи, ее публикации в научном журнале, подготовке и защите диссертации, и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скалабан, А. Системы авторской идентификации как инструменты повышения видимости научных публикаций в Интернете [Электронный ресурс] / А. Скалабан, И. Юрик // Системный анализ и прикладная информатика. – 2015. – № 4. – С. 4–10. – Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_25781305_73327615.pdf. – Дата доступа: 15.12.2021.
2. Якимчик, А.И. Базы данных цитирований и идентификаторы исследователей [Электронный ресурс] / А.И. Якимчик // Геофиз. журн. – 2020. – Т. 42, № 3. – С. 79–109. – Режим доступа: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i3.2020.204703>.

⁴ Руководство пользователя корпоративной версии системы «Антиплагиат.ВУЗ» [Электронный ресурс]. URL: <http://corp.antiplagiat.ru/events/94-rukovodstvopolzovatelya.html>

3. Абраров, Р.Д. Как работает антиплагиат? Принцип работы антиплагиата / Р.Д. Абраров, М.М. Худайбергана // Молодой ученый. – 2016. – № 29.3(133.3). – С. 1–2. – Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/133/37339/>. – Дата доступа: 09.12.2021.
4. Кулешова, А.В. По лезвию бритвы, или как самоцитирование не превратит в самоплагиат / А.В. Кулешова, Ю.В. Чехович, О.С. Беленькая // Науч. ред. и изд. – 2019. – № 4 (1–2). – С. 45–51. – DOI 10.24069/2542-0267-2019-1-2-45-51.
5. Щетинина, Е.А. Использование системы «Антиплагиат» для анализа учебных и научных изданий / Е.А. Щетинина, Д.И. Попов, В.А. Зотов // Университетская книга: традиции и современность : материалы науч.-практ. конф., 2015. – Ростов н/Д : Изд-во ЮФУ. – С. 126–132.
6. Пряхина, Е.О. Анализ программ решения проблемы плагиата в сети Интернет / Е.О. Пряхина, Е.К. Симдянкина, Д.В. Лучанинов // Постулат. – 2016. – № 5. – С. 19.
7. Чехович, Ю.В. О практике обнаружения заимствований в российских вузах [Электронный ресурс] / Ю.В. Чехович, А.А. Ивахненко, О.С. Беленькая // Унив. кн. – 2017. – № 4. – Режим доступа: <http://www.unkniga.ru/innovation/tehnology/7119-o-poryadke-obnaruzheniya-zaimstvovaniy-v-rossijskih-vuzah.html>. – Дата доступа: 10.12.2021.
8. Стрелкова, И.Б. Экспертная оценка оригинальности научных работ с помощью системы «Антиплагиат» в структуре формирования академической грамотности молодых исследователей / И.Б. Стрелкова // Выш. шк. – 2019. – № 2. – С. 3–7.

REFERENCES

1. Skalaban, A., & Yurik. I. (2015). Sistemy avtorskoj identifikacii kak instrumenty povysheniya vidimosti nauchnyh publikacij v Internetе [Author identification systems as tools for increasing the visibility of scientific publications on the Internet]. *Sistemnyj analiz i prikladnaya informatika* [System analysis and applied informatics], 4, 4–10. (In Russ., abstr. in Engl.). https://elibrary.ru/download/elibrary_25781305_73327615.pdf
2. Yakimchik, A.I. (2020). Bazy dannyh citirovanij i identifikatory issledovatelej [Databases of citations and identifiers of researchers]. *Geofizicheskij zhurnal* [Geophysical Journal], Vol. 42, 3, 79–109. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i3.2020.204703>
3. Abrarov, R.D. & Khudayberganova, M.M. (2016). Kak rabotaet antiplagiat? Princip raboty antiplagiata [How does anti-plagiarism work? The principle of operation of anti-plagiarism]. *Molodoj uchenyj* [Young scientist], 29.3(133.3), 1–2. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://moluch.ru/archive/133/37339/>
4. Kuleshova, A.V., Chekhovich, Yu.V., & Belen'kaya O.S. (2019). Po lezviyu britvy, ili kak samocitirovanie ne prevratit' v samoplgiat [On the razor's edge, or how not to turn self-citation into self-plagiarism]. *Nauchnyj redaktor i izdatel'* [Scientific editor and publisher], 4(1–2), 45–51. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.24069/2542-0267-2019-1-2-45-51
5. Shchetinina, E.A., Popov D.I., & Zotov V.A. (2015). Ispol'zovanie sistemy «Antiplagiat» dlya analiza uchebnyh i nauchnyh izdaniy [Using the «Anti-plagiarism» system for the analysis of educational and scientific publications]. *Universitetskaya kniga: tradicii i sovremennost'* [University book: traditions and modernity] (126–132). (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Pryahina, E.O., Simdyankina, E.K., & Luchaninov D.V. (2016). Analiz programm resheniya problemy plagiata v seti Internet [Analysis of programs for solving the problem of plagiarism in the Internet]. *Postulat* [Postulate], 5, 19. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Chekhovich, Yu.V., Ivahnenko A.A., & Belen'kaya, O.S. (2017). O praktike obnaruzheniya zaimstvovaniy v rossijskih vuzah [On the practice of detecting borrowings in Russian universities]. *Universitetskaya kniga* [University book], 4. <http://www.unkniga.ru/innovation/tehnology/7119-o-poryadke-obnaruzheniya-zaimstvovaniy-v-rossijskih-vuzah.html> (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Strelkova, I.B. (2019). Ekspertnaya ocenka original'nosti nauchnyh rabot s pomoshch'yu sistemy «Antiplagiat» v strukture formirovaniya akademicheskoy gramotnosti molodyh issledovatelej [Expert assessment of the originality of scientific papers using the «Anti-plagiarism» system in the structure of the formation of academic literacy of young researchers]. *Vyshejschaya shkola* [Higher School], 2, 3–7. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 11.01.2022

MODERN DIGITAL SCIENTIFIC ENVIRONMENT:
TECHNOLOGIES AND TOOLS OF A SCIENTIST

M. SHUKHANKOVA

Today, in the age of the fourth digital revolution, the age of digitalization of many areas of life in general, science and education in particular, young scientists from research organizations and institutions of higher education face difficulties in preparing publications and in promoting the results of their research. In the process of digital transformation, new areas of work have emerged that are directly related to various educational and scientific platforms, the digitalization of research and the promotion of results in the global scientific space. The tasks of scientific libraries are to help find answers to questions related to increasing publication activity, promoting publications in the world's scientometric systems and databases.

Keywords: scientists, information resources, scientific libraries, library resources, author's identifiers, scientometric database, text borrowings.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Громыко П.Н., Макацария Д.Ю., Хатетовский С.Н. Определение нормальных сил в зацеплении эксцентриковой передачи при поступательном движении сателлитного колеса	2
Попок Н.Н., Беляков Н.В., Яснев Д.А. Система поддержки принятия решений по базированию моделей деталей машин в рабочей зоне 3D-принтеров.....	9
Козловский В.И., Петров О.А. Влияние конструктивных и эксплуатационных параметров на прочностные характеристики вала ротора горизонтальной бисерной мельницы.....	21
Семенченко М.В. Совершенствование оборудования для диффузионного насыщения проволоочного материала	27
Жорник В.И., Запольский А.В., Ивахник А.В., Дудан А.В. Технологии и оборудование для производства биоразлагаемых пластичных смазок.....	32

ТРАНСПОРТ

Скирковский С.В. Исследование причин возникновения ДТП методом эпидемиологического анализа.....	44
Капский Д.В., Леванович Д.В., Вигерина Т.В., Головнич А.К. Обоснование выбора средств и процессов контроля скорости движения транспортных средств	54
Капский Д.В., Леванович Д.В., Иванов В.П., Головнич А.К. Анализ детектирования параметров дорожного движения	63
Аземша С.А., Кравченя И.Н., Ворона А.В. Разработка мероприятий по снижению дорожно-транспортного травматизма с участием незащищенных категорий участников дорожного движения	72
Аземша С.А., Морозов В.М. Обоснование направления развития пассажирского транспорта в Республике Беларусь	78
Семченков С.С., Капский Д.В. Снижение непродуктивных затрат маршрутного пассажирского транспорта секторальным методом.....	85
Завистовский В.Э., Завистовский С.Э. Влияние компонентов покрытия на процесс взаимодействия микропор с трещинами при восстановлении деталей машин.....	91

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Иванов В.П., Бондарев А.С., Кульбей А.Г. Исследование факторов, влияющих на образование и развитие коррозионного растрескивания под напряжением на магистральных газопроводах	95
Сафронова Е.В., Спиридонов А.В. Исследование физико-механических свойств нефтяного кокса.....	103
Спириденко Л.М., Богданович Н.А., Захаров А.Р. Реконструкция существующей системы утилизации переточного газа Осиповичского ПХГ	108
Вайтехович П.Е., Мытько Д.Ю. Подobie процессов гидродинамики и массопередачи в регулярной структурированной насадке.....	114

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

Иванов В.П. Научная статья в системе диссертационного исследования	121
Андреева И.Н. Методические рекомендации для написания научной статьи.....	126
Нияковский А.М. Из опыта работы над статьями к диссертации	130
Шуханкова М.Н. Современная цифровая научная среда: технологии и инструменты ученого	133