

MIESIĘCZNIK  
POŁOCKI.

Т о м I.  
Р о к 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  
Серыя В. Прамысловасць. Прыкладныя навукі

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

---

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

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

---

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования.

Адрес редакции:  
Полоцкий государственный университет, 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 04.03.2021. Бумага офсетная 80 г/м<sup>2</sup>. Формат 60×84<sup>1/8</sup>. Цифровая печать.  
Усл. печ. л. 10,70. Уч.-изд. л. 12,89. Тираж 100 экз. Заказ 141.

## МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 631.3:658.345

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ С.-Х. МАШИН В РАСТЕНИЕВОДСТВЕ ПО ИХ ПОКАЗАТЕЛЮ ПРИСПОСОБЛЕННОСТИ К ВЫПОЛНЕНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕГУЛИРОВОК

А.Л. МИСУН

(Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск)

*Проанализирована травмоопасность по видам производственной деятельности в растениеводческой отрасли АПК. Определены для различных по своему функциональному назначению технических средств, используемых в растениеводстве, показатели их безопасной эксплуатации (приспособленность технического средства к технологической регулировке, безопасность ее выполнения, риск травмирования работника и др.).*

**Ключевые слова:** производственный риск, безопасность, приспособленность к технологическим регулировкам, технические средства, растениеводческая отрасль.

**Введение.** Для проведения исследований по оценке безопасности эксплуатации технических средств, используемых в растениеводческой отрасли АПК, были выбраны с учетом статистических данных [1] наиболее травмоопасные виды производственной деятельности (таблица 1) и соответствующие новые технические разработки отечественного производства. Точность оценки безопасности технических средств существенно зависит от количества экспертов и их квалификации. Уменьшение числа экспертов приводит к снижению точности оценки, а при слишком большом их количестве становится сложнее выявлять их согласованное мнение.

Таблица 1. – Оценка травмоопасности по видам производственной деятельности в растениеводческой отрасли АПК (1997–2019 гг.)

Вид производственной деятельности	Количество происшествий						
	всего случаев	%	случаев с тяжелым исходом	%	случаев со смертельным исходом	%	случаев в среднем за год
Уборка и послеуборочная обработка зерновых	414	36,0	295	36,3	119	35,3	18
Заготовка кормов	299	26,0	222	27,4	77	22,7	13
Обработка почвы, внесение удобрений, посев	138	12,0	82	10,0	56	16,7	6
Уборка картофеля и корнеплодов	92	8,0	70	8,6	22	6,5	4
Наезд транспортными средствами на людей	92	8,0	68	8,4	24	7,1	4
Прочие	115	10,0	76	9,3	39	11,7	5
<b>Итого</b>	<b>1150</b>	<b>100</b>	<b>813</b>	<b>100</b>	<b>337</b>	<b>100</b>	<b>50</b>

**Основная часть.** Для установления необходимого количества экспертов с целью оценки технических средств к безопасному выполнению технологических регулировок предположим, что величина среднего квадратического отклонения  $\sigma$  при малой выборке  $n$  равняется 1,5 единицам, и требуется, чтобы среднее арифметическое значение выборки  $\bar{X}$  находилось не далее чем на расстоянии одной единицы (в нашем случае условно примем один балл) от суммы  $\mu$  (среднего значения оценки). Для нормального распределения это требование означает [2], что половина ширины доверительного интервала, т.е. половина от

$$\left( \bar{X} + \frac{U_{1-\alpha/2} \cdot s}{\sqrt{n}} \right) - \left( \bar{X} - \frac{U_{1-\alpha/2} \cdot s}{\sqrt{n}} \right) = \frac{2u_{1-\alpha/2} \cdot s}{\sqrt{n}}$$

должна равняться 1. Это условие можно записать как

$$\frac{U_{1-\alpha/2} \cdot s}{\sqrt{n}} = 1,0.$$

Полагая, например,  $a = 0,10$  при  $\sigma = 1,5$ , получаем [3]:

$$1,29 \cdot \frac{1,5}{\sqrt{n}} \quad \text{или} \quad n = \frac{(1,29 \cdot 1,5)^2}{1,0} \approx 4,0,$$

т.е. минимальный объем выборки ( $n$ ) – количество экспертов для проведения исследований должно быть не менее четырех. При этом вероятность того, что выборочное среднее будет отличаться от среднего совокупности не более чем на один балл, составляет 90%. Эксперты тестировались, а затем полученные результаты тестов оценивались по обобщенному показателю ( $K_{об}$ ), который рассчитывался как среднее арифметическое значение нормализованных оценок по результатам тестов (таблица 2).

Таблица 2. – Результаты тестирования предполагаемых экспертов

Номер кандидата в эксперты	Показатели профессионально-значимых качеств			Обобщенный показатель ( $K_{об}$ )
	$X_1''$	$X_2''$	$X_3''$	
1	0,929	0,917	0,880	0,909
2	0,957	0,917	0,960	0,945
3	0,929	0,833	0,840	0,867
4	0,914	1,000	0,960	0,958
5	0,929	0,833	0,880	0,881

Результаты расчета показали высокую согласованность мнений специалистов, оценивающих предполагаемых экспертов (коэффициент конкордации ( $W$ ) равен 0,96). Обработка данных тестирования (таблица 3) позволила получить уравнение регрессии для оценки профессионально-значимых качеств у предполагаемых экспертов [4].

Экспертная оценка одного из показателей безопасной эксплуатации исследуемых технических средств – приспособленности технологических регулировок, проводилась отдельно как в целом по группам показателей (удобство, доступность, безопасность), так и по показателям внутри группы. Во всех случаях проверялась согласованность ранжировок друг с другом, для чего использовался коэффициент конкордации [5]:

$$W = \frac{12 \cdot S}{k^2 \cdot n(n-1)},$$

где  $S$  – сумма квадратов разностей (отклонений) между фактическими суммами рангов ( $j$ -го параметра у  $j$ -го эксперта) и их средним значением;

$k$  – число экспертов;

$n$  – число показателей.

Адекватность распределения ранжировок экспериментальных данных проверялась с использованием критерия Фишера ( $F$ ) при выбранном уровне значимости и числах степеней свободы [6], а результаты проверки «нулевой» гипотезы для уровня доверия 0,95 приведены в таблице 3. Установлены незначительные отклонения фактических значений от регрессионных, также незначительна разница (0,021) положительных и отрицательных значений (таблица 4).

Таблица 3. – Результаты проверки «нулевой» гипотезы значимости профессиональной компетенции экспертов

Гипотеза	Уровень доверия	Статистика критерия	Значение квантили	Результаты
$\theta_0 = 0$	0,95	6,750	0,953	Нулевая гипотеза отвергается
$\theta_1 = 0$		2,120	0,991	
$\theta_2 = 0$		3,370	0,970	
$\theta_3 = 0$		2,700	0,984	

Таблица 4. – Показатель профессиональной компетентности предполагаемых экспертов

Номер кандидата в эксперты	Общая оценка специалистов, балл	Расчетный показатель профессиональной компетентности	Остатки
1	4	4,369	-0,369
2	5	4,632	0,368
3	4	4,143	-0,143
4	5	4,643	0,357
5	4	4,234	-0,234

Задачей дальнейших экспериментальных исследований было установление профессионально подготовленными экспертами приспособленности (удобства, доступности и безопасности) технологических регулировок рабочих органов технических средств для выполнения технологических процессов. В качестве объектов исследований были выбраны технические средства отечественного производства, используемые в растениеводческой отрасли АПК, в т.ч. платформа с манипулятором для транспортировки кормов ПМК-10, агрегат для распределения и уплотнения кормов в хранилищах АРУК-5, погрузчик-метатель зерна ПМЗ-100, агрегат широкозахватный комбинированный АКШ-9, агрегат почвообрабатывающий многофункциональный АПМ-6А, плуг 12-корпусный оборотный ПО-(8+4)-40, сеялка пневматическая С-9, культиватор рядовой КГ-1, грядоделатель навесной ГН-1, картофелесажалка СК-4, комбайн для уборки капусты КПК-1. Результаты сравнительного анализа экспертной оценки приспособленности технических средств к регулировкам показали, что наименее удобными являются регулировки давления сошников на почву, рыхлителей следа колес трактора и сеялки, тормозов колесного хода (сеялка пневматическая С-9). К наиболее труднодоступным можно отнести регулирование усилий догрузки боковых секций рабочих органов агрегата широкозахватного комбинированного АКШ-9, глубины хода рыхлительных лап (агрегат почвообрабатывающий многофункциональный АПМ-6А), ширины захвата первого корпуса плуга 12-корпусного оборотного ПО-(8+4)-40 и его настройка в режиме «вне борозды»; регулировка подшипников ступицы колеса и глубины хода сошников сеялки пневматической С-9, установки междурядья и угла атаки роторов, глубины обработки рабочим органом сеялки пневматической С-9; нормы высева посадочного материала и уровня заполнения высаживающих аппаратов картофелесажалки СК-4, длины среза кочерыжки комбайном для уборки капусты КПК-1 и др. Наиболее травмоопасными являются регулировки усилий догрузки боковых секций рабочих органов агрегата АКШ-9, ширины захвата первого корпуса плуга ПО-(8+4)-40, давления сошников на почву сеялки С-9, замены рабочих органов культиватора КГ-1, створы между делителями комбайна КПК-1 и некоторые др.

Для установления объективности оценки экспертов, исследуемых приспособленность технических средств к технологическим регулировкам, применялся метод [7], основанный на использовании интервальных оценок  $\bar{\delta}_i$  и  $\sigma_i$ , где

$$\bar{\delta}_i = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n} \quad \text{– систематическая составляющая погрешности;}$$

$\delta_i = x_i - x$  – погрешность оценки для каждого эксперта ( $x_i$  – текущая оценка;  $x$  – истинное значение оценки безопасности технического средства);

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta}_i)^2}{n-1}} \quad \text{– среднее квадратичное отклонение систематической ошибки.}$$

Анализируя исходные данные выборки, полагаем, что погрешность ( $\delta_i$ ) подчиняется нормальному закону распределения случайной величины  $x$ . Введем нечеткое множество реалистичности оценок  $R$  и функцию  $\mu = \mu_R(\bar{\delta}_i)$  принадлежности этого множества  $R$  [8]. Выбор функции принадлежности осуществляем исходя из информации о результатах оценивания

$$R = \int_{\delta_{i \text{ нам.}}}^{\delta_{i \text{ наб.}}} \frac{\mu_R(\bar{\delta}_i)}{\bar{\delta}_i} d\bar{\delta}_i$$

каждым экспертом

$$\mu_R(\bar{\delta}_i) = \begin{cases} 0, & \bar{\delta}_i < a_1, \\ \frac{\bar{\delta}_i - a_1}{b_1 - a_1}, & a_1 \leq \bar{\delta}_i < b_1, \\ \frac{c_1 - \bar{\delta}_i}{c_1 - b_1}, & b_1 \leq \bar{\delta}_i < c_1, \\ 0, & \bar{\delta}_i \geq c_1, \end{cases}$$

где  $a_1, b_1, c_1$  – пределы экспертных оценок для расчета  $\bar{\delta}_i$ .

Принтегрировав  $\mu = \mu_R(\bar{\delta}_i)$ , получим выражение для множества  $R$ :

$$R = \frac{1}{b_1 - a_1} (\bar{\delta}_i - a_1 \ln|\bar{\delta}_i|) \Big|_{\bar{\delta}_{i \text{ наим.}}}^{b_1} + \frac{1}{c_1 - b_1} (c_1 \ln|\bar{\delta}_i| - \bar{\delta}_i) \Big|_{\bar{\delta}_{i \text{ наиб.}}}^{b_1} + \\ + \frac{1}{b_1 - a_1} (b_1 - \bar{\delta}_{i \text{ наим.}} - a_1 \ln|b_1| + a_1 \ln|\bar{\delta}_{i \text{ наиб.}}|) + \frac{1}{c_1 - b_1} (c_1 \ln|\bar{\delta}_{i \text{ наиб.}}| - \bar{\delta}_{i \text{ наиб.}} - c_1 \ln|b_1| + b_1).$$

С помощью функции принадлежности нечеткого множества рассчитывается коэффициент реалистичности оценок каждого эксперта  $k_i^*$ :

$$k_i^* = \frac{1}{\bar{d}_{i \text{ наиб.}} - \bar{d}_{i \text{ наим.}}} \left( \int_{\bar{d}_{i \text{ наим.}}}^{b_1} \frac{\bar{d}_i - a_1}{(b_1 - a_1)} d\bar{d}_i + \int_{b_1}^{\bar{d}_{i \text{ наим.}}} \frac{c_1 - \bar{d}_i}{(c_1 - b_1)} d\bar{d}_i \right) = \\ = \frac{1}{\bar{d}_{i \text{ наиб.}} - \bar{d}_{i \text{ наим.}}} \left( \frac{1}{b_1 - a_1} \left( \frac{b_1^2}{2} - a_1 b_1 - \frac{\bar{d}_{i \text{ наим.}}^2}{2} + a_1 \bar{d}_{i \text{ наим.}} \right) + \frac{1}{c_1 - b_1} \left( c_1 \bar{d}_{i \text{ наиб.}} - \frac{\bar{d}_{i \text{ наиб.}}^2}{2} - c_1 b_1 + \frac{b_1^2}{2} \right) \right).$$

Используя данные выборки оценок экспертов, получаем  $k_3^* > k_2^* > k_1^*$ .

Для нахождения стабильности оценок каждого эксперта составим нечеткое множество стабильных оценок  $T$  и функцию принадлежности этого множества:

$$T = \int_{\sigma_{i \text{ наим.}}}^{\sigma_{i \text{ наиб.}}} \frac{\mu_T(\sigma_i)}{\sigma_i} d\sigma_i. \\ \mu_T(\sigma_i) = \begin{cases} 0, & \sigma_i < a^*, \\ \frac{2(\sigma_i - a^*)^2}{(b^* - a^*)^2}, & a^* \leq \sigma_i < \frac{a^* + b^*}{2}, \\ 1 - \frac{2(\sigma_i - a^*)^2}{(b^* - a^*)^2}, & \frac{a^* + b^*}{2} \leq \sigma_i < b^*, \\ 1, & \sigma_i \geq b^*, \end{cases}$$

$$T = \frac{2}{(b^* - a^*)^2} \left( \frac{(a^* + b^*)^2}{8} - (a^* + b^*)a^* + (a^*)^2 \ln \left| \frac{a^* + b^*}{2} \right| - \frac{\sigma_{i \text{ наим.}}^2}{2} + 2a^* \sigma_{i \text{ наим.}} - (a^*)^2 \ln|\sigma_{i \text{ наим.}}| \right) + \ln|\sigma_{i \text{ наиб.}}| - \\ - \ln \left| \frac{a^* + b^*}{2} \right| - \frac{2}{(b^* - a^*)^2} \left( \frac{\sigma_{i \text{ наиб.}}^2}{2} - 2\sigma_{i \text{ наиб.}} a^* + (a^*)^2 \ln|\sigma_{i \text{ наиб.}}| - \frac{(a^* + b^*)^2}{8} + 2a^* \frac{a^* + b^*}{2} - (a^*)^2 \ln \left| \frac{a^* + b^*}{2} \right| \right),$$

где  $a^*, b^*, c^*$  – пределы экспертных оценок для расчета  $\sigma_i$ ,

$$k_{i \text{ наим.}}^* = \frac{1}{\sigma_{i \text{ наим.}} - \sigma_{i \text{ наиб.}}} \left( \int_{\sigma_{i \text{ наим.}}}^{\frac{a^* + b^*}{2}} \frac{2(\sigma_i - a^*)^2}{(b^* - a^*)^2} d\sigma_i + \int_{\frac{a^* + b^*}{2}}^{\sigma_{i \text{ наиб.}}} \left( 1 - \frac{2(\sigma_i - a^*)^2}{(b^* - a^*)^2} \right) d\sigma_i \right).$$

Анализ средних квадратичных отклонений систематических ошибок для каждого эксперта ( $\sigma_1 = 0,1806, \sigma_2 = 0,1762, \sigma_3 = 0,1800$ ) дал возможность оценить как коэффициенты стабильности выставленных ими оценок ( $k_{2 \text{ стаб}}^* > k_{3 \text{ стаб}}^* > k_{1 \text{ стаб}}^*$ ), так и в целом констатировать, что предложенная балльная методика позволяет в достаточной степени объективно количественно взвесить тот или иной показатель приспособленности рассматриваемых технических средств к регулировкам с учетом требуемой компетентности привлекаемых для этого экспертов.

Также по результатам исследований был рассчитан [3] показатель безопасного управления технологическим процессом, определены зоны повышенной опасности при выполнении технологических регулировок рабочих органов (устранения отказов) технических средств, выделены те регулировки, риск травмирования при выполнении которых близок к предельному уровню. Это регулировка усилия догрузки боковых секций рабочих органов и глубины обработки почвы S-образными пружинными стойками с лапами на каждой секции (агрегат широкозахватный комбинированный АКШ-9), установки угла атаки роторов, междурядья и глубины обработки (культиватор грядовой КГ-1) и др. (таблица 5).

Таблица 5. – Показатели безопасности технических средств для возделывания сельскохозяйственных культур

Техническое средство (разработчик; год выпуска)	Наименование регулировки	Показатель приспособленности технологической регулировки средства ( $K_{пл}$ )		Показатель безопасности выполнения технологической регулировки средства ( $K_{сп}$ )		Риск травмирования оператора МСХТ ( $P_2$ ) при выполнении регулировки, %		Уровень опасности производства риска при выполнении регулировки		Обобщенный показатель приспособленности технического средства к технологическим регуляторам ( $K_{тм.с.}$ )		Показатель безопасности управления технологическим процессом ( $K_{сп}$ )		Риск травмирования оператора технического средства ( $P_{тс}$ ), %		Уровень опасности производства риска при использовании технического средства	
		3	4	5	6	7	8	9	10								
1. Агрегат для распределения уплотнения кормов в хранилищах АРУК-5 (РУП «ННЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2017 г.)	Подъем (опускание) распределителя кормов и катка уплотнителя	0,97	0,98	0,6	минимальный	0,90	0,94	1,1	минимальный	0,19	0,26	10,5	минимальный (граничный)				
	Привода распределяющих роторов	0,97	0,98	0,5	минимальный	0,90	0,94	1,1	минимальный	0,19	0,26	10,5	минимальный (граничный)				
	Подъем (опускание) одного из отражателей	0,97	0,98	0,5	минимальный	0,90	0,94	1,1	минимальный	0,19	0,26	10,5	минимальный (граничный)				
2. Платформа с манипулятором для транспортировки кормов ПМК-10 (РУП «ННЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2015 г.)	Управление краном подъема опускания левого или правого отражателя	0,74	0,84	5,8	минимальный	0,45	0,56	6,1	минимальный	0,45	0,56	6,1	минимальный				
	Регулировка подшипников ступиц колес	0,36	0,47	6,4	минимальный	0,45	0,56	6,1	минимальный	0,45	0,56	6,1	минимальный				
3. Полуприцеп самосвальный тракторный ПТ-15С (РУП «ННЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2017 г.)	Регулировка подшипников ступиц колес	0,36	0,47	6,4	минимальный	0,45	0,56	6,1	минимальный	0,45	0,56	6,1	минимальный				
	Регулировка тормозов	0,53	0,68	5,8	минимальный	0,45	0,56	6,1	минимальный	0,45	0,56	6,1	минимальный				

Продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5	6			7	8	9	10
					минимальный	минимальный	минимальный (граничный)				
4. Погрузчик-метатель зерна ПМЗ-100 (РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2015 г.)	Наклона трубы триммера	0,74	0,84	1,9	минимальный						
	Поворота триммера	0,74	0,84	1,9	минимальный						
	Включения-выключения блока ведущих колес	0,53	0,65	10,5	минимальный (граничный)	0,75	0,83	1,9	минимальный		
	Направления движения	0,63	0,75	6,0	минимальный						
	Ход (вперед-назад)	0,97	0,98	0,5	минимальный						
	Переключения скорости (рабочая/ транспортная)	0,97	0,98	0,4	минимальный						
	Усилия догрузки боковых секций рабочих органов	0,39	0,51	14,7	предельный						
	Нагрузки на выравниватели и катки	0,74	0,84	4,8	минимальный	0,50	0,61	9,9	минимальный		
	Заглубления планок планчатого катка	0,57	0,69	7,4	минимальный						
	Глубины обработки почвы S-образными пружинными стойками с лапами на каждой секции	0,36	0,48	18,7	предельный						
6. Агрегат почвообрабатывающий многофункциональный АПМ-6А (РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2014 г.)	Глубины хода дисковых рабочих органов в пределах 6-12 см	0,86	0,92	1,9	минимальный						
	Равномерности распределения веса агрегата в поперечном направлении	0,97	0,98	0,2	минимальный						
	Глубины хода рыхлительных лап	0,54	0,66	10,1	минимальный (граничный)	0,54	0,65	3,2	минимальный		
	Регулировка подшипников колес	0,28	0,38	17,4	минимальный						
	Регулировка тормозов	0,28	0,38	7,4	минимальный						
	Ширины междурадий дисков первого и второго ряда	0,74	0,84	4,9	минимальный						
	Высоты отвала	0,64	0,76	5,8	минимальный						
	Регулировка рессорного предохранителя	0,74	0,84	1,9	минимальный						
	Установки рамы плуга	0,97	0,99	0,2	минимальный	0,61	0,71	2,0	минимальный		
	Глубины пахоты и выравниности рамы в продольной плоскости	0,97	0,99	0,2	минимальный						
7. Плуг 12-ти корпусный оборотный ПО-(8+4)-40 (РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2017 г.)	Ширина захвата первого корпуса	0,40	0,52	11,5	минимальный (граничный)						
	Настройки плуга для работы в режиме «вне борозды»	0,28	0,38	7,4	минимальный						

Продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8. Сялка пневматическая С-9 (РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2013 г.)	Регулировка высеваших аппаратов	0,97	0,98	0,2	минимальный				
	Регулировка воздушного потока высевашей системы	0,97	0,98	0,2	минимальный				
	Давления сошников на почву	0,36	0,47	9,4	минимальный				
	Глубины хода сошников	0,64	0,76	4,4	минимальный				
	Регулировка рыхлителей следа колес трактора и селки	0,26	0,36	7,7	минимальный	0,40	0,48	2,2	минимальный
	Регулировка загорточного устройства	0,86	0,92	0,9	минимальный				
	Регулировка маркеров	0,86	0,92	0,9	минимальный				
	Регулировка тормозов колесного хода	0,11	0,15	14,1	предельный				
	Регулировка подшипников ступицы колеса	0,11	0,15	14,1	предельный				
	Регулировка стояночного тормоза	0,18	0,25	6,3	минимальный				
9. Культиватор грядовой КТ-1 (РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2017 г.)	Глубины обработки	0,43	0,55	18,8	предельный				
	Установки угла атаки роторов	0,43	0,55	18,8	предельный	0,39	0,51	13,5	минимальный (граничный)
	Регулировка «замена рабочих органов»	0,47	0,59	7,3	минимальный				
	Установки междурядья	0,28	0,38	14,9	предельный				
10. Грядоделатель навесной ГН-1 (РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2017 г.)	Высоты гряды	0,43	0,55	14,3	предельный				
	Нагжения рессоры	0,74	0,84	2,9	минимальный				
	Управления маркерами	0,97	0,98	0,2	минимальный	0,61	0,71	3,2	минимальный
	Ширины гряды	0,43	0,55	14,3	предельный				
	Установки маркеров	0,54	0,66	6,0	минимальный				
	Управления запорными кранами	0,74	0,84	2,0	минимальный				
11. Картофелесажалка СК-4 (РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2015 г.)	Нормы высева посадочного материала	0,54	0,66	4,0	минимальный				
	Нормы высева минеральных удобрений	0,74	0,84	2,0	минимальный				
	Уровня заполнения высеваших аппаратов	0,36	0,47	6,3	минимальный	0,38	0,49	7,6	минимальный
	Регулировка высоты борозды	0,28	0,38	22,3	предельный				
	Глубины хода сошников	0,28	0,38	22,3	предельный				
Размеры междурядий	0,28	0,47	19,3	предельный					

Окончание таблицы 5  
1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12. Комбайн для уборки капусты КПК-1 (РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2015 г.)	Створы между делителями	0,53	0,65	8,3	минимальный				
	Расстояния между отбойниками и полотном	0,74	0,84	2,9	минимальный				
	Длины среза кочерыжки	0,53	0,65	<b>10,7</b>	<b>минимальный (граничный)</b>	0,67	0,77	2,7	минимальный
	Регулировка листоотделения	0,74	0,84	2,9	минимальный				
	Скорости транспортера	0,74	0,84	2,9	минимальный				
	Напряжения цепей	0,53	0,65	8,3	минимальный				
	Высоты теробильного аппарата	0,97	0,98	0,2	минимальный				
13. Установка для мойки корнеклубне-плодов УМК-10 (РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2015 г.)	Напряжения приводного ремня моечного барабана	0,54	0,66	8,2	минимальный				
	Скорости вращения моечного барабана	0,97	0,98	0,5	минимальный				
	Напряжения цепи роликков	0,64	0,76	5,8	минимальный	0,66	0,76	3,3	минимальный (граничный)
	Регулировка слива воды и очистки ванны	0,43	0,55	<b>15,3</b>	<b>предельный</b>				
	Наклона моечного барабана	0,86	0,92	1,9	минимальный				
14. Машина для полировки овощей МПК-10 (РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2015 г.)	Скорости роликкового транспортера	0,97	0,98	0,5	минимальный				
	Напряжения цепи роликкового транспортера	0,97	0,98	0,5	минимальный	0,89	0,93	1,1	минимальный
	Наклона выгрузного лотка	0,74	0,84	0,4	минимальный				

**Заключение.** Результаты исследований позволили обосновать количественные показатели безопасности для различных по своему функциональному назначению технических средств, используемых в растениеводческой отрасли АПК, разработать алгоритм, методику расчета [10] и соответствующее программное обеспечение [11].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Организационно-технические мероприятия для повышения безопасности и улучшения условий труда операторов мобильной сельскохозяйственной техники / Л.В. Мисун [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2012. – 192 с.
2. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: методы обработки данных / Н. Джонсон, Ф. Лион. – М. : Мир, 1980. – 610 с.
3. Результаты исследований безопасности труда на клюквенных чеках в условиях изменяющихся параметров производственной среды / В.В. Азаренко [и др.] // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграрных навук. – 2016. – № 1. – С. 109–116.
4. Мисун, А.Л. Оценка производственного риска при возделывании сельскохозяйственных культур / А.Л. Мисун // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2017. – № 11. – С. 134–139.
5. Леонов, А.Н. Основы научных исследований и моделирования : учеб.-метод. комплекс / А.Н. Леонов, М.М. Дечко, В.Б. Ловкис. – Минск : БГАТУ, 2010. – 276 с.
6. Введение в исследование операций / У. Черчмен [и др.]. – М. : Мир, 1968. – 488 с.
7. Бурков, Е.А. Определение субъективности и надежности экспертных оценок на основе анализа статистических данных / Е.А. Бурков // Изв. гос. электротехн. ун-та. – 2010. – № 9. – С. 33–38.
8. Конышева, Л.К. Основы теории нечетких множеств / Л.К. Конышева, Д.М. Назаров. – СПб. : Питер, 2011. – 192 с.
9. Мисун, А.Л. Управление уровнем профессиональных рисков в промышленном выращивании клюквы / А.Л. Мисун // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. тематич. сб. : в 2 т. / РУП НПЦ НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва. – Минск, 2016. – Вып. 50, т. 2. – С. 128–134.
10. Азаренко, В.В. Методические подходы оценки и управления производственным риском в растениеводческой отрасли АПК Беларуси / В.В. Азаренко, А.Л. Мисун, А.Л. Мисун // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграрных навук. – 2017. – № 3. – С. 99–108.
11. Тестирование функционального состояния технического средства с учетом оценки его приспособленности к технологическим регулировкам и безопасности их выполнения : компьютерная программа : а.с. 1166 / А.Л. Мисун, В.В. Азаренко. – Оpubл. 27.03.2019.

Поступила 20.09.2020

#### FORECASTING THE SAFE USE OF AGRICULTURAL MACHINES IN CROP PRODUCTION BASED ON THEIR FITNESS TO PERFORM TECHNOLOGICAL ADJUSTMENTS

*A. MISUN*

*The analysis of injury risk by types of production activities in the crop industry of the agro-industrial complex is made. Indicators of their safe operation (adaptability of the technical means to technological adjustment, safety of its implementation, risk of injury to the employee) are determined for various functional purposes of technical means used in crop production.*

**Keywords:** *production risk, safety, adaptability to technological regulations, technical means, crop industry.*

УДК 669.15

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА ТЕМПЕРАТУРУ И СТРУКТУРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ОБРАЗЦОВ ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

*д-р техн. наук, проф. А.В. АЛИФАНОВ<sup>1,2</sup>, В.В. МАЛЕРОНОК<sup>1</sup>,  
канд. техн. наук, доц. И.А. БОГДАНОВИЧ<sup>1</sup>, А.А. ЛЯХ<sup>2</sup>, канд. техн. наук А.М. МИЛЮКОВА<sup>1</sup>,  
О.А. ТОЛКАЧЕВА<sup>2</sup>*

*(<sup>1</sup>Барановичский государственный университет,*

*<sup>2</sup>Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск)*

*Установлена зависимость температуры на поверхности цилиндрического стального образца и величины падения напряжения в поверхностном слое при пропускании токов высокой частоты и режимами магнитно-импульсной обработки. Результаты проведенных экспериментов показали, что в интервале температур поверхности 20–35 °С происходит исправление дефектов кристаллической структуры, затем измельчение зерен, причем в интервале температур 85–105 °С измельчение носит интенсивный характер, а после 105 °С размер зерен начинает резко увеличиваться. Анализ полученных результатов позволил установить характер структурных превращений в поверхностном слое образцов при определенных режимах магнитно-импульсной обработки: структурные изменения соответствуют сначала первичной, а затем вторичной рекристаллизации.*

**Ключевые слова:** *стальные образцы, магнитно-импульсная обработка, температура, первичная рекристаллизация, вторичная рекристаллизация, токи высокой частоты, величина падения напряжения.*

**Введение.** Известно, что рекристаллизация в металлических изделиях происходит под воздействием деформации и температуры за два этапа: первичная рекристаллизация и вторичная (собирательная) рекристаллизация [1]. В процессе первичной рекристаллизации происходит исправление дефектов кристаллической решетки, снижение остаточных напряжений, а также измельчение зерен. В процессе вторичной (собирательной) рекристаллизации размеры зерен начинают увеличиваться за счет поглощения мелких зерен более крупными, в результате образуется крупнозернистая структура.

В настоящей работе ставится задача путем магнитно-импульсной обработки создать в стальных изделиях мелкозернистую однородную структуру, обладающую оптимальным сочетанием твердости и пластичности, что обеспечит высокую прочность изделия, в частности, инструмента. Также необходимо установить температурные интервалы на поверхности изделий, в которых происходит сначала резкое измельчение зерен, а затем интенсивное их увеличение. Это позволит определить, какие структурно-фазовые превращения в изделии происходят в этих температурных интервалах.

**Основная часть.** Учеными ФТИ НАН Беларуси и сотрудниками учреждения образования «Барановичский государственный университет» разработана новая технология повышения прочностных свойств стальных изделий, как закаленных, так и незакаленных, путем воздействия сильным импульсным электромагнитным полем. При таком воздействии устраняются дефекты в кристаллической решетке, выравниваются внутренние напряжения, измельчается и становится более однородной структура металла [2].

Преимуществом магнитно-импульсной обработки по сравнению с известными методами упрочнения является то, что геометрические параметры и качество поверхности упрочненных изделий не меняются; не требуются дополнительная термообработка и финишные операции, а сам процесс отличается низким энергопотреблением, высокой производительностью, экологической чистотой.

Магнитно-импульсная обработка металлов основана на взаимодействии импульсного магнитного поля с металлической заготовкой. Источником импульсного магнитного поля является индуктор, через который пропускается мощный импульс электрического тока.

Установка для магнитно-импульсной обработки металлов представляет собой генератор импульсного тока, состоящий из емкостного накопителя электрической энергии (высоковольтной конденсаторной батареи), рабочего органа (индуктора) и коммутирующего устройства (высоковольтного управляемого разрядника). С помощью разрядника осуществляется разряд конденсаторной батареи на индуктор. В рабочей зоне индуктора импульсное магнитное поле наводит в находящейся в нем металлической заготовке вихревые токи.

В результате взаимодействия токов индуктора и заготовки возникают мощные механические усилия, оказывающие давление как на заготовку, так и на индуктор. В то же время под влиянием вихревых токов импульсно и локально возникает высокая температура. Таким образом, воздействие магнитно-импульсной обработки способствует повышению давления и температуры, что может послужить толчком к началу процесса рекристаллизации.

Для проведения исследований по изучению взаимосвязи между температурой на поверхности цилиндрического стального образца и структурно-фазовыми превращениями в материале под воздействием магнитно-импульсной обработки была разработана экспериментальная методика. Она заключается в измерении температуры на поверхности образца после каждого разряда магнитно-импульсной установки и последующем измерении величины падения напряжения в поверхностном слое образца в процессе пропускания ТВЧ через этот слой (скин-слой).

По результатам измерений были построены графики изменения температуры на поверхности образца и падения напряжения в скин-слое при пропускании токов высокой частоты. По изменению измеряемых величин определяли характер структурно-фазовых превращений в скин-слое (устранение дефектов кристаллической решетки, изменение остаточных внутренних напряжений, начало и окончание первичной рекристаллизации, начало и окончание вторичной кристаллизации).

Температуру поверхности образца после каждого электромагнитного импульса измеряли с помощью мультиметра ALEX 9808 с термопарой ТХА (ГОСТ 1790) с погрешностью измерения  $\pm 1,0\%$  при температуре от  $-20$  °С до  $+400$  °С и с погрешностью измерения  $\pm 1,5\%$  при температуре от 400 до 1000 °С.

Измерение температуры носит скорее качественный сравнительный характер, а не количественный, т.к. под воздействием магнитно-импульсной обработки высокая температура (700–1000 °С) возникает в локальных очагах с большей или меньшей концентрацией различных дефектов, в результате чего происходят структурные преобразования. Возникающая локально высокая температура мгновенно «рассеивается» по всему объему образца за счет высокой теплопроводности материала и составляет 20–200 °С. Однако в различных сталях и при различных режимах магнитно-импульсной обработки температура может заметно отличаться, что говорит о большем или меньшем воздействии импульсного магнитного поля на образец и, соответственно, распространении тепловой энергии внутри него.

На рисунке 1 показана зависимость падения напряжения (*a*) и температуры (*b*) поверхностного слоя цилиндрического образца из стали Р6М5 от количества импульсов при магнитно-импульсной обработке (энергия импульсов 10 кДж). Частота тока изменялась от 0,1 до 0,005 МГц; однако характер соответствующих кривых для всех частот был одинаков, отличаясь только по величине напряжения. С увеличением количества импульсов напряжение сначала быстро уменьшается, затем начинает повышаться и достигает максимума при 7 импульсах, а затем снова довольно интенсивно снижается (рисунок 1, *a*).

На рисунке 1, *b* показаны результаты измерения температуры на поверхности образца после каждого электромагнитного импульса. Количество импульсов изменялось от 0 до 10, температура поверхности при этом повышалась от 20 до 175 °С. На экспериментальной кривой сверху показана температура поверхности после каждого импульса, а внизу кривой приведены цифры, обозначающие предполагаемую мгновенную температуру внутри поверхностного слоя (рисунок 1, *a*).

Уменьшение напряжения тока в поверхностном слое стального (закаленного) образца после двух импульсов свидетельствует об исправлении дефектов кристаллической решетки при температуре 350–375 °С. Далее начинается постепенное повышение напряжения (соответственно и электросопротивления), связанное с началом первичной рекристаллизации и ростом новых зародышей зерен. При семи импульсах происходит максимальное повышение напряжения (рисунок 1, *a*), соответствующее температуре первичной рекристаллизации, равной 595 °С. При этом образуется мелкозернистая однородная структура, представленная на рисунке 2, *a*, с большим количеством межзеренных границ, затрудняющих прохождение электрического тока (что отражено на рисунке 1, *a* в виде максимального значения напряжения, соответствующего максимальному значению электросопротивления).

При дальнейшем повышении температуры при воздействии дополнительных электромагнитных импульсов процесс первичной рекристаллизации сменяется вторичной, или собирательной, рекристаллизацией, при которой начинается интенсивное укрупнение зерен (рисунок 2, *b–z*).

Известно, что между минимальной температурой рекристаллизации и температурой плавления различных металлов существует зависимость

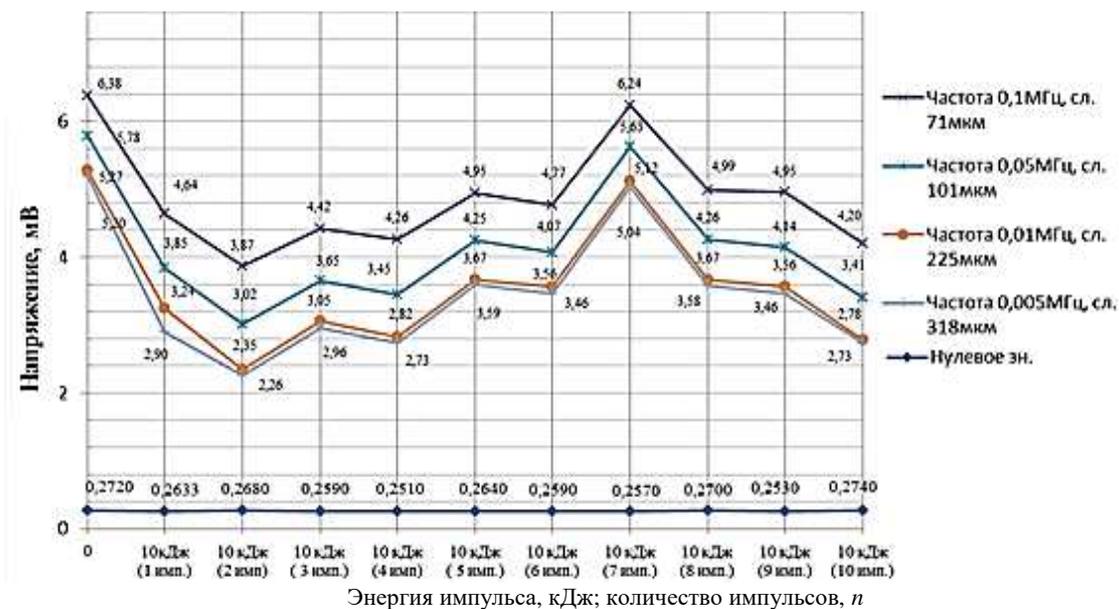
$$T_{рек} = \alpha T_{пл},$$

где  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от чистоты металла;

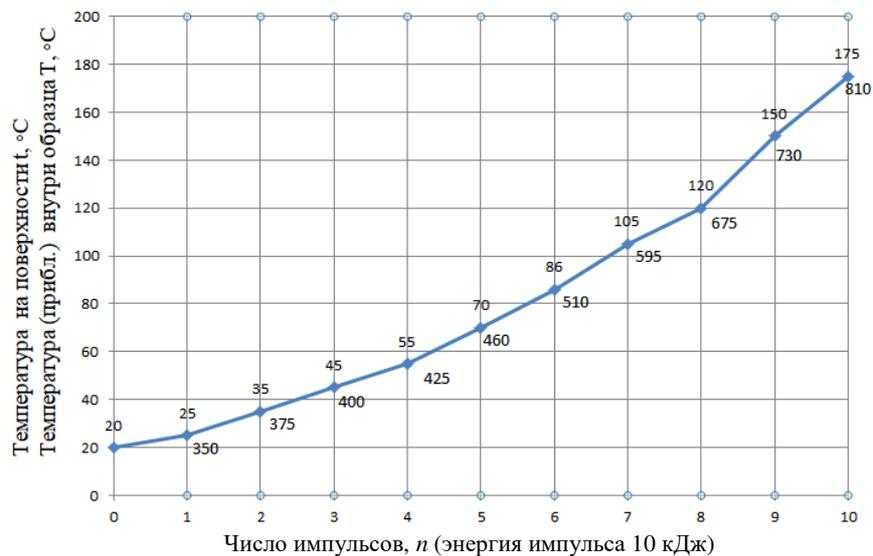
$T_{пл}$  – температура плавления, °С.

Чем выше чистота металла, тем ниже температура рекристаллизации. У металлов обычной химической чистоты  $\alpha = 0,3–0,4$ . Температура рекристаллизации сплавов, как правило, выше, чем чистых металлов, и в некоторых случаях достигает  $0,8T_{пл}$  [3].

На рисунке 1, *a*, *b* окончание первичной и начало вторичной рекристаллизации происходит при температуре 595 °С, что соответствует  $T_{рек} = 0,45T_{пл}$ . Однако в данной работе зависимость температур в очагах структурных преобразований от режима магнитно-импульсной обработки (в данном случае – от количества импульсов при их энергии 10 кДж) носит характер физической модели и в дальнейших исследованиях будет уточняться.

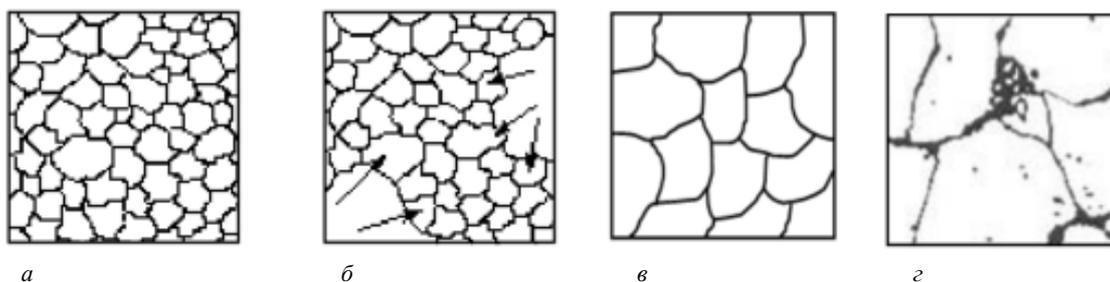


а



б

Рисунок 1. – Зависимость падения напряжения тока (а) и температуры (б) поверхностного слоя образца из стали Р6М5 от количества импульсов при магнитно-импульсной обработке (энергия импульса 10 кДж)



а

б

в

з

а – окончание стадии первичной рекристаллизации (7 импульсов, 10 кДж на рисунках 1, а, б); б, в, з – начало и окончание стадии вторичной (собирающей) рекристаллизации (8, 9 и 10 импульсов на рисунках 1, а, б)

Рисунок 2. – Изменение размера зерен при увеличении температуры стального образца в процессе магнитно-импульсной обработки

В интервале температур 85–105 °С на поверхности образца из стали Р6М5 происходит резкое измельчение зерен, что подтверждается ростом напряжения тока (рисунки 1, а, б, 2, а). При дальнейшем повышении температуры за счет многократных электромагнитных импульсов происходит увеличение размера зерен, что хорошо видно на рисунке 2.

Температура на поверхности образца от 85 до 105 °С возникает при 6–7 импульсах, при этом происходит максимальное измельчение зерен. При увеличении количества импульсов до 8–10 температура повышается от 120 до 175 °С, что приводит к началу и окончанию вторичной рекристаллизации и, соответственно, к максимальному увеличению зерен.

Известно, что образование мелкодисперсной, однородной структуры в закаленном стальном образце обычно несколько снижает твердость, но повышает пластичность, что в целом увеличивает прочность изделия, в частности, его стойкостные показатели. Укрупнение зерен приводит к значительному снижению твердости и прочности изделий [3].

Следовательно, оптимальным режимом магнитно-импульсной обработки инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, позволяющим значительно повысить его эксплуатационные характеристики, можно считать режим, соответствующий 7 импульсам при энергии импульса, равной 10 кДж.

**Заключение.** Результаты проведенных исследований позволяют установить взаимосвязь между режимами магнитно-импульсной упрочняющей обработки и структурными преобразованиями, происходящими в поверхностном слое упрочняемого изделия типа сверла, метчика, концевой фрезы и т.п., изготовленного из быстрорежущей стали Р6М5. Показано, что если магнитно-импульсная обработка повышает температуру в изделии до значений, обеспечивающих первичную рекристаллизацию, то в поверхностном (упрочняемом) слое устраняются дефекты кристаллической решетки и образуется однородная, мелкозернистая структура, что способствует значительному повышению износостойкости режущего инструмента [4–6].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Горелик, С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов / С.С. Горелик, С.В. Добаткин, Л.М. Капуткина. – М. : МИСИС, 2005. – 432 с.
2. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка металлических изделий / А.В. Алифанов [и др.] // Технология ремонта, восстановления и упрочнению деталей машин, механизмов, оборудования, инструментов и технологической оснастки : материалы 9-й Междунар. практ. конф., Санкт-Петербург, 10–13 апр. 2007 г. : в 2 ч. – СПб. : Изд.-во политехн. ун-та, 2007. – Ч. 1. – 509 с.
3. Гуляев, А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – М. : Металлургия, 1966. – 480 с.
4. Магнитострикционный механизм оборудования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии / А.В. Алифанов [и др.] // Весн. Нац. Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2016. – № 4. – С. 31–36.
5. Исследование электрофизических свойств стальных образцов после магнитно-импульсной обработки / А.В. Алифанов [и др.] // Весн. БарГУ. Сер. Техн. науки. – 2018. – Вып. 6. – С. 33–38.
6. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка металлорежущих сверл из быстрорежущей стали / А.М. Милокова [и др.] // Весн. БарГУ. Сер. Техн. науки. – 2018. – Вып. 6. – С. 50–56.

*Поступила 30.10.20*

#### STUDYING THE INFLUENCE OF MAGNETIC IMPULSE REGIMES TEMPERATURE AND STRUCTURAL TRANSFORMATIONS PROCESSING IN THE SURFACE LAYERS OF FAST-CUTTING STEEL SAMPLES

**A. ALIFANOV, V. MALERONOK, I. BOGDANOVICH,  
A. LIACH, A. MILIUKOVA, O. TOLKACHEVA**

*The dependence of the temperature on the surface of a cylindrical steel sample and the magnitude of the voltage drop in the surface layer when passing high-frequency currents and modes of magnetic-pulse processing has been established. The results of the experiments showed that in the surface temperature range of 20–35 °С, the defects of the crystal structure are corrected, the grains are refined, and in the temperature range of 85–105 °С, the grinding is then intense, and at 105 °С the grain size begins to increase sharply. An analysis of the results obtained makes it possible to establish the nature of structural transformations in the surface layer of the samples under certain modes of magnetic pulse treatment: structural changes correspond first to primary and secondary recrystallization.*

**Keywords:** *steel samples, magnetic-pulse treatment, temperature, primary recrystallization, secondary recrystallization, high-frequency currents, drop value.*

УДК 681.2

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ, РЕГИСТРАЦИИ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ОЦИФРОВКИ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ****С.Н. АБРАМЕНКО, В.С. АНИСИМОВ, К.В. КОРБА**  
(Полоцкий государственный университет)

*Предложена система для измерения и регистрации процессов, протекающих при высокоскоростной обработке материалов, с последующей оцифровкой полученных экспериментальных данных и их передачей в специализированное программное обеспечение. Сформулированы технические требования к подобным системам, обоснован выбор структурных элементов. Предложен виртуальный прибор, на котором реализован модуль сбора данных, базирующийся на трех структурах: одной Timed Loop, отвечающей за синхронный сбор данных, и двух While Loop, одна из которых отвечает за нормализацию данных и видимость элементов графиков, вторая – за запись данных в файл.*

**Ключевые слова:** программно-аппаратный комплекс, контроллер, преобразователь.

**Введение.** Необходимость снижения себестоимости производимой продукции для сохранения конкурентоспособных позиций на рынке требует повышения производительности и качества выпускаемой продукции. Для выполнения этих установок в области процессов механической обработки происходит последовательное смещение в сторону высокоскоростных процессов обработки.

Исходя из этого, производителями оборудования и инструментальной оснастки было предложено достаточно много решений для процессов высокоскоростной обработки (ВСО). В частности, были разработаны мощные мотор-шпиндели, позволяющие работать продолжительное время на скоростях вращения до  $10^5$  с<sup>-1</sup> и обеспечивающие малый уровень радиального биения и высокую механическую жесткость. Стали использоваться инструментальные оправки с возможностью устранения дисбаланса, были усовершенствованы системы автоматизированной технологической подготовки (САМ), что дало возможность назначать и рассчитывать сложные пространственные траектории движения инструмента при постоянной нагрузке на инструмент в процессе резания, а системы ЧПУ приобрели достаточную производительность, быстроедействие и объем памяти для обеспечения непрерывной обработки на высоких скоростях.

Появилось экспериментальное измерительное оборудование, как например, высокоскоростные аналого-цифровые преобразователи (АЦП) с достаточным разрешением, а также соответствующие первичные преобразователи (ПП), что позволяет получать данные о процессе резания в реальном времени. Разработанное современное прикладное программное обеспечение дает возможность производить обработку и регистрацию данных для последующей обработки и анализа в масштабе реального времени.

Однако, несмотря на наличие в настоящее время высокоскоростных АЦП и ПП, пригодных для построения систем измерения и регистрации процессов, протекающих при механической обработке, существует очень мало комплексных коммерческих систем такого типа. Фактически все сводится к системам, производимым фирмой Kistler (Швейцария). Эти системы обладают великолепными эксплуатационными характеристиками, но имеют очень высокую стоимость (порядка нескольких десятков тысяч евро).

Целью данной работы являлась разработка и создание системы для измерения и регистрации процессов, протекающих при ВСО, с возможностью последующей обработки полученных экспериментальных данных.

В общем случае системы такого типа состоят из следующих функциональных узлов:

- первичного преобразователя, содержащего от одного до шести элементов преобразования сила–измеряемая величина (3 компоненты силы и 3 компоненты крутящего момента);
- измерительного усилителя-преобразователя;
- системы обработки, индикации и регистрации данных, полученных в процессе измерения.

В качестве первичного преобразователя был использован динамометр УДМ-600, обеспечивающий измерение трех компонентов силы резания и одного крутящего момента. Данный динамометр предназначен для измерения сил резания при различных видах механической обработки. Он может одновременно измерять три ортогональные силы  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ , а также крутящий момент  $M_{кр}$ . Максимальная нагрузка на ось составляет 6 кН. Заявленная полоса пропускания составляет 0–500 Гц.

После анализа доступных компонентов систем для обработки и регистрации сигналов выбор был сделан в пользу оборудования фирмы National instruments (NI). Так, в качестве измерительного усилителя-

преобразователя применялся модуль С-серии NI-9237, позволяющий производить синхронную обработку сигналов тензометрических датчиков. Скорость оцифровки составляет 50 кГц при разрешении 24 бит. Данный модуль предназначен для работы в составе модульных измерительных систем серии с DAQ и систем с RIO. Отличительной особенностью модуля является возможность работать как с полномостовыми, так и полу-/четверть мостовыми тензорезистивными датчиками. Существует возможность проводить программно-аппаратную калибровку измерительной системы на базе данного модуля. В нем имеется адаптивный фильтр нижних частот (ФНЧ), изменяющий свою полосу пропускания в зависимости от скорости оцифровки сигнала. Эти функциональные возможности значительно упрощают построение измерительных систем на базе данного модуля, т.к. обеспечивают простое подключение первичных преобразователей, особенно полу- и четвертьмостовой конфигурации, простую и быструю калибровку измерительной системы, а также первичную фильтрацию измеряемого сигнала от помех.

Система обработки, индикации и регистрации данных состоит из следующих компонентов:

- шасси сбора данных типа NI cDAQ-9172, в одном из слотов которого смонтирован модуль NI-9237. Шасси имеет 8 слотов для модулей С-серии, что позволяет создавать достаточно сложные и гибкие тестовые системы, т.к. номенклатура модулей С-серии достаточно широка и включает в себя различные модули аналоговых и цифровых входов/выходов, интерфейсные и специализированные модули [2]. Данное шасси имеет интерфейс USB 2.0 для обмена данными с управляющим контроллером и обеспечивает питание смонтированных модулей [3];

- в качестве управляющего контроллера используется система на базе шасси National Instruments PXI-1042 с установленным контроллером NI PXI-8106. Шасси PXI-1042 предназначено для построения сложных тестовых систем на базе модульных приборов формата PXI. В данном шасси может быть размещено до 8 модулей формата PXI. Шасси обеспечивает обмен данными между установленными модулями и управляющим контроллером верхнего уровня, а также тактовую синхронизацию модулей либо от встроенного источника опорной частоты 10 МГц, либо от внешнего источника в случае работы в качестве ведомого устройства в сложной системе. В случае работы в качестве ведущего устройства работает в качестве источника опорной частоты для синхронизации ведомых устройств [4];

- контроллер NI PXI-8106 представляет собой специализированный встроенный компьютер на базе процессора Intel Core 2 Duo под управлением операционной системы Windows Vista Business. В качестве среды разработки применяется программное обеспечение NI LabView Full Development System. Для взаимодействия среды разработки, прикладного программного обеспечения и аппаратных средств выступает драйвер устройств NI Measurement and Automation Explorer [5–7];

- в качестве накопителя используется USB-flash диск объемом 32 Гб. Применение внешнего накопителя обусловлено удобством эксплуатации, т.к. не занимает место на встроенном в контроллер винчестере и упрощается перенос результатов экспериментов на другие компьютеры для дальнейшей обработки и анализа.

Структурная схема системы приведена на рисунке 1. Внешний вид компонентов системы представлен на рисунке 2.

Проведенный анализ измерения и регистрации процессов, протекающих при ВСО, позволил сформулировать следующие требования к проектируемой системе:

- количество измерительных каналов: 3, для каждого из компонентов силы резания;
- тип используемого первичного преобразователя: УДМ-600, или аналогичный по функциям;
- предел измерения сил (определяется используемым первичным преобразователем):  $\pm 6000$  Н;
- отображение измеренных значений сил для каждого канала;
- возможность отображения изменения сил во времени в виде осциллограммы;
- возможность регистрации полученных данных на цифровой носитель.

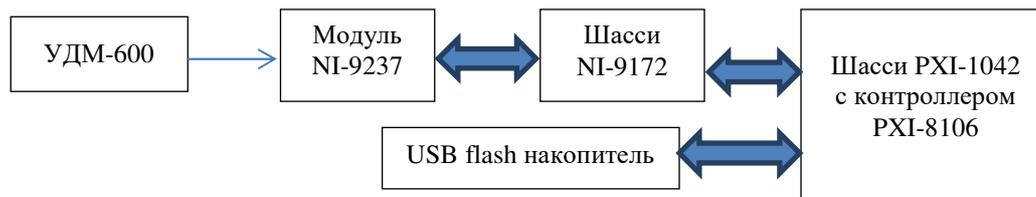
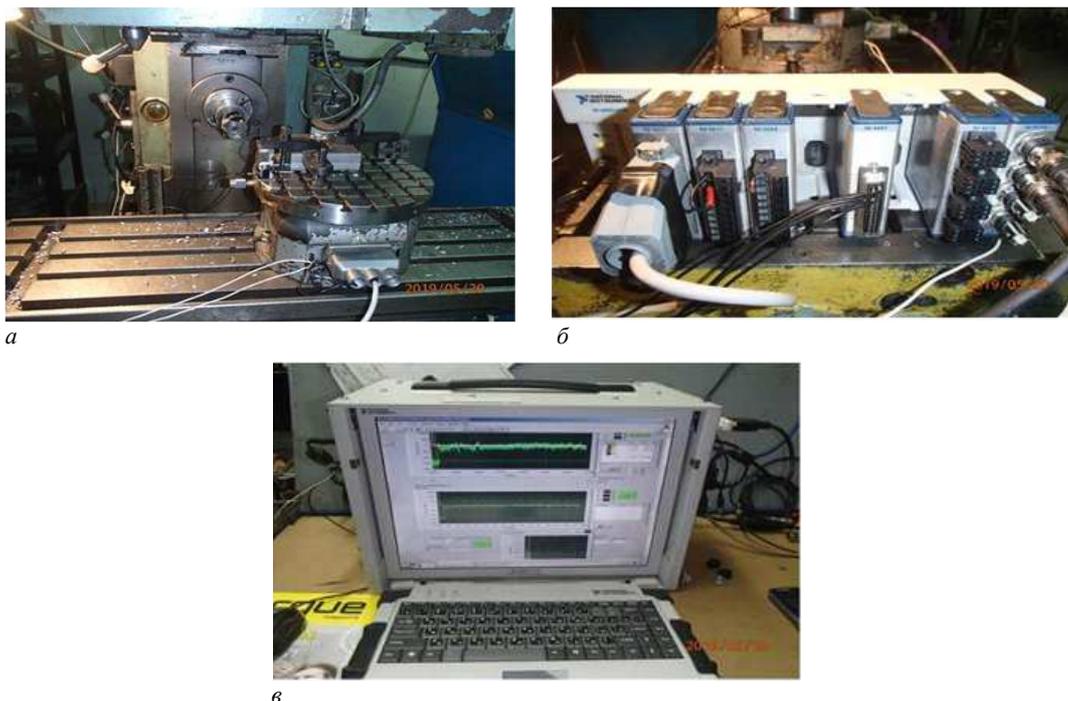


Рисунок 1. – Структурная схема системы обработки, индикации и регистрации данных



**а** – динамометр УДМ600, смонтированный на станке;  
**б** – шасси NI cDAQ-9172 с установленными и подключенными модулями, **в** – шасси PXI-1042

**Рисунок 2. – Компоненты системы**

Исходя из технических характеристик динамометра УДМ-600, а именно рабочего частотного диапазона 0–500 Гц, согласно теореме Котельникова, при  $F_c = 500$  Гц минимально достаточный период дискретизации составляет

$$T_d = \frac{1}{2 F_c} = \frac{1}{2 \cdot 500} = 0,001 \text{ с},$$

что соответствует частоте оцифровки 1000 Гц. Для повышения точности обработки сигнала частота оцифровки была выбрана 25 кГц. Дальнейшее повышение частоты оцифровки нецелесообразно, т.к. приводит к сильной нагрузке канала передачи данных между NI cDAQ-9172 и NI PXI-8106. И как показали натурные эксперименты, скорость передачи данных резко падает при наличии вблизи таких источников электромагнитных помех, как работающие мощные электродвигатели, частотные преобразователи и сервосистемы, что характерно для современных станков ЧПУ. В результате серии экспериментов выбор был сделан в пользу частоты оцифровки 25 кГц: на этой частоте система стабильна, оцифрованный сигнал имел приемлемое качество и оставалась возможность увеличения частоты оцифровки или добавления каналов обработки аналоговых или цифровых данных.

Система работает следующим образом. Динамометр УДМ-600 является тензорезистивным датчиком, выполненным по полумостовой схеме. Схема подключения изображена на рисунке 3 [1].

Подключение динамометра к модулю NI-9237 выполнено по стандартной схеме подключения модуля для полумостовых тензорезистивных датчиков.

Наиболее важными компонентами программного обеспечения (фирмы National instruments) управления измерительной системой являются:

- драйвер устройств NI Measurement and Automation Explorer (NI MAX) для взаимодействия периферийных устройств со средой разработки;
- среда разработки LabView, основанная на технологии виртуальных приборов и обеспечивающая сбор и обработку данных с периферийных устройств посредством прикладных программ.

Калибровка измерительной системы, состоящей из динамометра УДМ-600 и модуля NI-9237, осуществлялась посредством драйвера устройств NI MAX при помощи эталонного динамометра. Процесс калибровки динамометра УДМ-600 для оси Z изображен на рисунке 4. Для оси X и Y были проведены аналогичные процедуры.

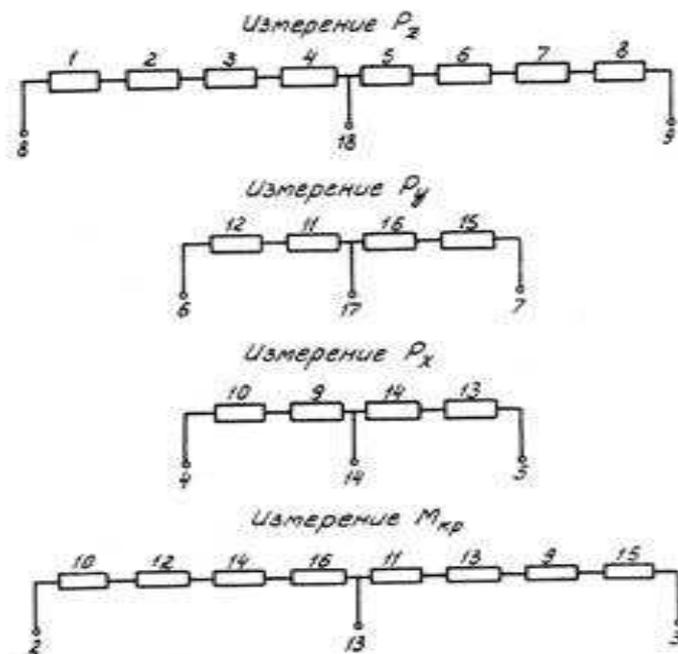


Рисунок 3. – Схема подключения динамометра УДМ-600



Рисунок 4. – Процесс калибровки оси Z

Посредством драйвера устройств было сформирована задача по синхронной выборке пакета данных. Пакет данных состоял из 1250 выборок для каждого из трех каналов с частотой оцифровки 25 кГц по запросу от прикладного программного обеспечения, состоящего из двух модулей:

- модуля сбора, первичной обработки и регистрации данных в виде измерительных файлов;
- модуля чтения и обработки данных из измерительных файлов.

В задачи модуля сбора данных входил сбор оцифрованных данных, получаемых от динамометра УДМ-600 и оцифрованных модулем NI-9237. Также данным модулем производится нормализация сигналов, первичная обработка полученных данных и регистрация их в виде файлов для дальнейшей обработки. Функция нормализации необходима, т.к. в силу конструктивных особенностей у динамометра УДМ-600 существует большой дрейф нуля при измерениях, что требует оперативной коррекции перед началом эксперимента.

В задачу модуля чтения и обработки данных из файлов входило чтение измерительных файлов, записанных в ходе экспериментов. Запись в измерительные файлы производится пакетами, состоящими

из массивов выборок размерностью  $3 \times 1250$ , поэтому для дальнейшей обработки необходимо произвести преобразование пакетов выборок в единый массив данных размерностью  $3 \times N$ , который может быть подвергнут дальнейшей обработке.

Передняя панель виртуального прибора модуля сбора данных показана на рисунке 5. На ней расположены две осциллограммы, на которых отображается два вида данных: измеренные мгновенные значения сил резания с частотой выборок 25 кГц, и дающие представления о быстропротекающих процессах при проведении эксперимента, и среднеквадратичные значения, полученные усреднением 1250 выборок, которые наглядно отображают динамику изменения сил резания в процессе эксперимента, – для этой осциллограммы имеется возможность управлять отображением отдельных компонент силы резания.

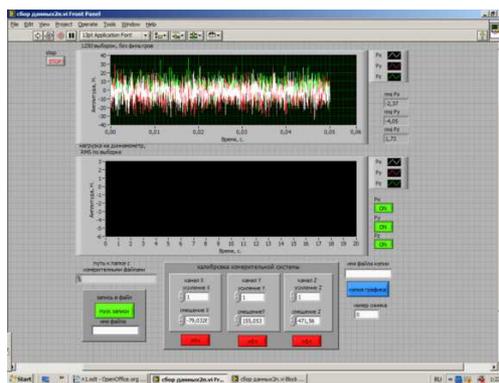


Рисунок 5. – Лицевая панель модуля сбора данных

Кроме того, на лицевой панели имеются элементы управления, позволяющие оперативную коррекцию нуля, коэффициента усиления для каждой компоненты силы резания, регистрации полученных данных в виде записи в измерительные файлы, а также получение копий графика среднеквадратичных значений в виде BMP-файлов. При записи данных о ходе эксперимента в измерительные файлы система автоматически генерирует три файла:

- измерительный файл с расширением \*.lvm, в котором регистрируются данные, полученные модулем NI-9237, подвергнутые только корректировке нуля и коэффициента усиления (нормализации);
- измерительный файл с именем типа rms-\*.lvm, который содержит данные, полученные в ходе эксперимента и подвергнутые усреднению (вычислению RMS для 1250 выборок);
- файл табличного формата с расширением \*.csv, содержащий данные, полученные в ходе эксперимента, подвергнутые усреднению и записанные в формате, доступном для чтения при помощи Microsoft Excel.

Сам виртуальный прибор, на котором реализован модуль сбора данных, базируется на трех структурах: одной Timed Loop, отвечающей за синхронный сбор данных, и двух While Loop, одна из которых отвечает за нормализацию данных и видимость элементов графиков, вторая – за запись данных в файл. Обмен блоками данных между структурами реализован при помощи уведомителей и локальных переменных.

**Заключение.** Предложенная система для измерения и регистрации процессов, протекающих при высокоскоростной обработке материалов, с последующей обработкой (оцифровкой) полученных экспериментальных данных, передачей данных в специализированное программное обеспечение, может служить в качестве измерительного инструмента на предприятиях машино- и приборостроительного профиля Республики Беларусь.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство к универсальному динамометру УДМ конструкции ВНИИ / ВНИИ ; под ред. А.Д. Мартынова. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : ВНИИ, 1969. – 21 с.
2. Модули CompactDAQ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ni.com/ru-ru/shop/select/compactdaq-modules-category#facet:&productBeginIndex:0&orderBy:&pageView:grid&pageSize:&>. – Дата доступа: 10.12.2020.
3. CDAQ-9172 CompactDAQ Chassis [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ni.com/documentation/en/compactdaq-chassis/latest/cdaq-9172>. – Дата доступа: 15.12.2020.
4. NI PXI-1042 Series User Manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371088a.pdf>. – Дата доступа: 12.12.2020.

5. NI PXI-8106 User Manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ni.com/pdf/manuals/372096b.pdf>. – Дата доступа: 15.12.2021.
6. NI 9237, 4 AI,  $\pm 25$  mV/V, 24 Bit, 50 kS/s/ch Simultaneous, Bridge Completion [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.ni.com/pdf/manuals/374186a\\_02.pdf](http://www.ni.com/pdf/manuals/374186a_02.pdf). – Дата доступа: 15.12.2021.
7. NI 9237 GETTING STARTED GUIDE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374186f.pdf> – Дата доступа: 15.12.2021.

Получена 30.11.2020

**SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR MEASUREMENT, REGISTRATION  
AND FOLLOWING PROCESSING OF PROCESSES PROCESSING  
AT HIGH-SPEED MECHANICAL PROCESSING**

**S. ABRAMENKO, V. ANISIMOV, K. KORBA**

*The proposed system for measuring and recording the processes occurring during high-speed processing of materials with subsequent processing (digitization) of the obtained experimental data and their transfer to specialized software. Technical requirements for such systems are formulated, the choice of structural elements is justified. A virtual device is proposed that implements a data acquisition module based on three structures: one Timed Loop, which is responsible for synchronous data collection, and two While Loop, one of which is responsible for data normalization and the visibility of graph elements, and the second is for writing data to file.*

**Keywords:** software and hardware complex, controller, converter.

## ТРАНСПОРТ

УДК 656.13

ПОСТРОЕНИЕ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИНДИКАТОРОВ  
ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ

С.В. СКИРКОВСКИЙ, А.Б. НЕВЗОРОВА

(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)

*Исследование направлено на выявление базисных индикаторов в виде переменных для анализа аварийных ситуаций в городских условиях с многофакторной точки зрения. Установлено, что из семи индикаторных переменных определяющими являются пять, на основе которых строится иерархическая система индикаторов для комплексной оценки дорожных аварийных ситуаций. Полученные результаты могут быть использованы при разработке проактивной системы обеспечения безопасности дорожного движения.*

**Ключевые слова:** аварийная ситуация, дорожно-транспортное происшествие, переменные, индикаторы.

**Введение.** На риск возникновения дорожно-транспортных происшествий (ДТП) и тяжесть их последствий воздействует сочетание различных факторов. Особенности сочетания и их взаимовлияния на дороге должны рассматриваться как приоритетная задача для повышения безопасности дорожного движения [1; 2]. Такой подход к анализу аварийности позволит принимать решения, которые действительно будут способствовать устранению сторонних причин создания конфликтных ситуаций.

Реальные причины ДТП могут быть установлены только детальным анализом каждого происшествия, обстоятельств и событий, приведших к возникновению несчастного случая, и зная причины происшествий, можно их предотвратить.

Исследования ДТП [1; 5–7] позволяют сформировать вывод, что ДТП имеет несколько причин. При этом практически невозможно установить причину, которая стала решающей в конкретном происшествии.

Связи между факторами, влияющими на ДТП, и частотой ДТП статистически зависимы, поэтому изучение аварийности с привлечением дополнительных данных об изменении опасности в транспортном потоке необходимо для получения достоверных выводов об относительной важности факторов, влияющих на ДТП.

Традиционно в академических кругах и практических отчетах возникновение и эволюцию несчастных случаев на дороге исследуют с точки зрения самой аварии [8–10]. Однако до сих пор не существует общепринятой универсальной концепции понимания причин возникновения ДТП и их предотвращения. Исследователи, работающие в различных областях науки и техники, пытаются разработать этиологическую теорию ДТП и определить их непосредственные причины. И чтобы глубже понять многомерные характеристики аварийных ситуаций с несчастными случаями на дороге в городских условиях, необходимо провести их количественную оценку и выявить наиболее значимые индикаторные факторы.

**Цель работы** – анализ статистических данных по различным причинам возникновения ДТП для определения наиболее значимых факторов в их взаимосвязи и влиянии на комплексный показатель ДТП в городских условиях.

**Методология выполнения работы.** В работе использовался регрессионный анализ для выявления взаимосвязей между несчастными случаями и различными факторами, такими как погода, дорожные условия, поведение водителя и т.д. Регрессионный анализ позволяет выявить взаимосвязи между группой переменных. Сначала он анализирует функциональную связь между ними, а затем проверяет точность этой связи. В данной работе для исследования влияния отдельных факторов используются одиночная линейная регрессия и многомерный линейный регрессионный анализ [3].

**Результаты исследований**

*1 этап. Отбор данных по заданным критериям.* Источником информации для анализа послужила база данных ГАИ Гомельской области об отчетных дорожно-транспортных происшествиях, случившихся за последние десять лет.

Данные, представленные в виде числового кода базы данных, конвертировались в электронные таблицы. Из доступных более чем 2100 записей исключены те, по которым отсутствуют данные по ключевым переменным. В результате с помощью фильтрации и проверки достоверности информации было отобрано 828 записей с компонентами, относящимся к ДТП, приведшим к несчастным случаям.

После предварительного отбора и анализа принятых к рассмотрению данных в программе STATISTICA были выделены случайные и сторонние факторы, значимо влияющие на совершение дорожно-транспортных происшествий [3; 4].

Необходимо не только найти взаимосвязь между обстоятельствами ДТП, но и статистику выборки. Главным критерием аварийности является тяжесть последствий дорожно-транспортных происшествий. В качестве зависимого фактора для этого анализа использовалась частота транспортных коллизий.

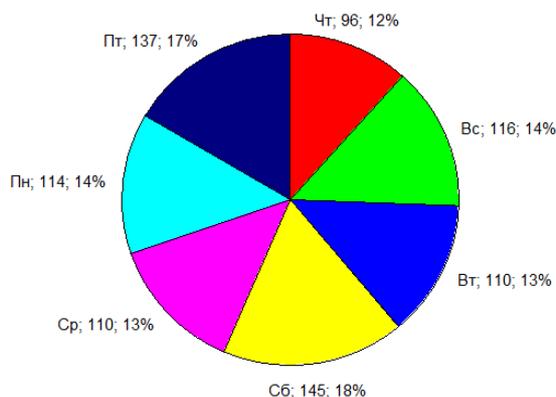
*2 этап. Классификация и систематизация факторов.* Обычно переменные компоненты (индикаторы) выбираются на основе их релевантности, доступности и обоснованности исследования. С другой стороны, индикатор больше ориентирован на проблему или результат.

На начальном этапе этого исследования были отобраны девять переменных компонент, которые отображают различные аспекты дорожной среды с высоким потенциалом для возникновения рисков для водителей. Анализ главных критериев использован для изучения достаточности этих переменных с тем, чтобы определить, является ли он статистически хорошо сбалансирован для разработки комплексного показателя (КП).

Один из самых важных аспектов в КП – наличие взаимосвязи между переменными компонентами. Отсутствие связи между этими показателями может привести к ошибочным выводам.

#### *Анализ переменных*

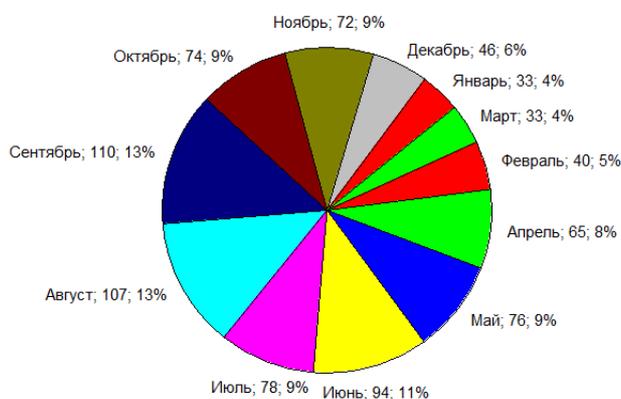
1. При анализе категориального фактора «День недели» установлено, что количество ДТП по дням недели распределяется следующим образом (рисунок 1): наиболее опасными днями являются пятница (17%), суббота (18%) и воскресенье (14%). Наименее аварийный день – четверг (12%).



**Рисунок 1. – Круговая диаграмма и частотная таблица по переменной «День недели»**

Очевидно, что конец рабочей недели отмечается наибольшим количеством ДТП, а в начале и середине недели совершается наименьшее количество происшествий [3].

2. При анализе распределения происшествий по месяцам года (переменная «Месяц») установлено, что наиболее неблагоприятными с точки зрения аварийности являются летние месяцы и начало осени (сентябрь). Наименее аварийными можно считать середину зимы (январь) и начало весны – март (рисунок 2).



**Рисунок 2. – Круговая диаграмма и частотная таблица по переменной «Месяц»**

Рост числа ДТП в конце лета и начале осени объясним ростом интенсивности движения, сложными погодными условиями, началом похолодания и дождей, а также психоэмоциональным состоянием водителей.

3. Распределение аварийности по времени суток характеризуется переменной «Время». При регистрации каждого ДТП фиксируется время его совершения. Значение этого фактора в некоторой степени субъективно из-за особенностей учета ДТП, но целью анализа является определение времени суток с наибольшей вероятностью совершения ДТП. Полученная гистограмма имеет локальный максимум от 18 до 20 часов и минимум в период с 1 часа ночи до 6 часов утра (рисунок 3).

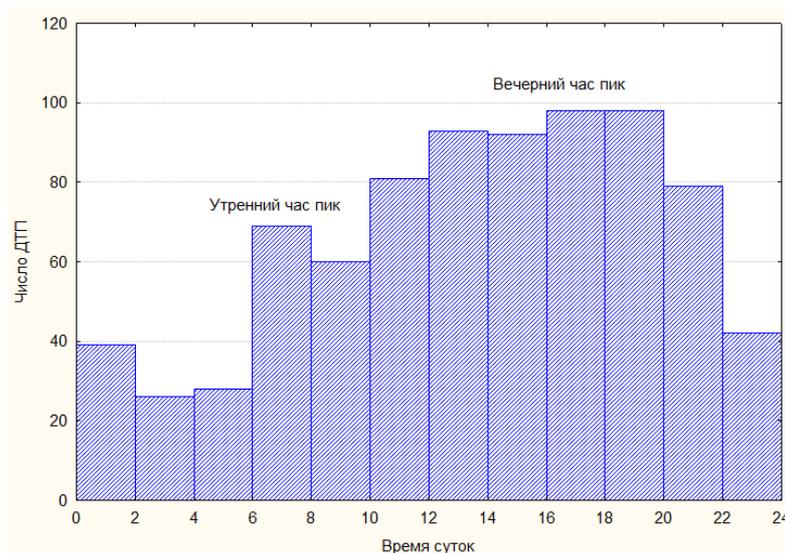


Рисунок 3. – Гистограмма аварийности в различное время суток

Характерно, что число аварий постепенно возрастает в течение всего дня и с 10 до 17 часов остается условно постоянной величиной. Пройдя вечерний пик (18–20 часов) число ДТП снижается к полуночи. Период с 0 до 2 часов ночи также отмечен локальным пиком аварий, вероятно, связанным с резким падением интенсивности движения в результате закрытия большинства городских объектов.

4. Частоту аварийных ситуаций по видам ДТП отражает фактор «Вид происшествия» (таблица 1).

Таблица 1. –Частотная таблица для различного вида происшествий

Category	Frequency table: вид происшествия			
	Count	Cumulative Count	Percent	Cumulative Percent
Попутное столкновение	60	60	7,25	7,25
На пересечении дорог	223	283	26,93	34,18
Лобовое столкновение	99	382	11,96	46,14
Опрокидывание	47	429	5,68	51,81
С ударом сзади	52	481	6,28	58,09
Наезд на велосипедиста	88	569	10,63	68,72
Наезд на препятствие	129	698	15,58	84,30
Столкновение со стоящим ТС	26	724	3,14	87,44
Столкновение с железнодорожным составом	1	725	0,12	87,56
Прочие ДТП	103	828	12,44	100,00
Missing	0	828		100,00

Согласно результатам группирования массива данных по данному классификационному признаку, наиболее часто встречающимся видом ДТП является столкновение транспортных средств на пересечении дорог или повороте.

4. Результирующий показатель тяжести последствий выражен двумя индикаторами: «Ранено» и «Погибло». Он отражает степень тяжести последствий в результате ДТП с фиксацией количества участников происшествия, получивших ранения или погибших, как со стороны нарушителя, так и со стороны пострадавшего (таблица 2).

Таблица 2. – Частотная таблица по числу раненых и погибших

Category	Frequency table: ранено			
	Count	Cumulative Count	Percent	Cumulative Percent
0	42	42	5,07	5,07
1	640	682	77,29	82,37
2	116	798	14,01	96,38
3	21	819	2,54	98,91
4	5	824	0,60	99,52
5	2	826	0,24	99,76
6	1	827	0,12	99,88
7	1	828	0,12	100,00
Missing	0	828	0,00	100,00
Category	Frequency table: погибло			
	Count	Cumulative Count	Percent	Cumulative Percent
0	746	746	90,10	90,10
1	73	819	8,82	98,92
2	4	823	0,48	99,40
3	5	828	0,60	100,00
Missing	0	828	0,00	

Задача снижения количества жертв и раненых при ДТП является приоритетной для дорожных и правоохранительных ведомств, поэтому для данной задачи можно считать эту переменную зависимой [4]. Распределение количества раненых и погибших имеет сложный вид и зависит от многих факторов – от состояния покрытия до освещенности. Установлено, что наиболее частыми являются ДТП, в которых ранено или погибло два человека.

5. Анализ переменной «Профиль дороги» позволяет судить об особенностях рельефа местности и технических характеристиках участка дороги, на котором произошел инцидент. В официальной статистике отмечается, что наиболее частой причиной происшествия является потеря управляемости машины на различных сложных участках дороги. Но потеря управляемости – это следствие воздействия одного из многочисленных факторов на автомобиль со стороны дороги, объединенных данной переменной (таблица 3).

Таблица 3. – Частотная таблица для числа ДТП на сложных участках

Category	Frequency table: профиль дороги			
	Count	Cumulative Count	Percent	Cumulative Percent
Горизонтальный участок	747	747	90,22	90,22
Уклон (спуск)	19	766	2,29	92,51
Уклон (подъем)	20	786	2,42	94,93
Кривая в плане	32	818	3,86	98,79
Прочее	3	821	0,36	99,15
Вершина подъема	3	824	0,36	99,52
Конец спуска	2	826	0,24	99,76
Кривая в профиле	1	827	0,12	99,88
Missing	1	828	0,12	100,00

К сожалению, необходимая информация есть не по всем ДТП, поэтому дальнейшее исследование распределения аварий, произошедших на сложных участках, может помочь локализовать наиболее опасные факторы.

Установлено, что по абсолютной величине наиболее аварийными являются горизонтальные участки дороги, затем следуют элементы с кривой в плане и уклоном. Наибольшая вероятность возникновения аварийных ситуаций на, казалось бы, самых безопасных участках – следствие их явного доминирования на дорогах.

6. Фактор «Освещение». Проанализированы данные о работе внешних осветительных приборов в разное время суток и в разное время года. Он является несущественным, однако движение с включенными фарами не только в темное, но светлое время суток снижает аварийность на дороге.

С одной стороны, наружное освещение положительно влияет на снижение аварийности путем улучшения видимости других участников дорожного движения и объектов в темноте. С другой – улуч-

шение видимости на дороге в темное время суток приводит к увеличению скорости движения и повышает количество происшествий и тяжесть их последствий.

7. Фактор «Погодные условия», сложившиеся на момент совершения ДТП, довольно значимый и влияющий на результат. Установлено, что большинство ДТП происходит в сухую, ясную или пасмурную погоду. В данном случае между этими классами переменной нет различий. Минимальное количество происшествий с пострадавшими различной степени тяжести в снежную или дождливую погоду говорит о небольшом влиянии этого фактора на рассматриваемый показатель (рисунок 4).

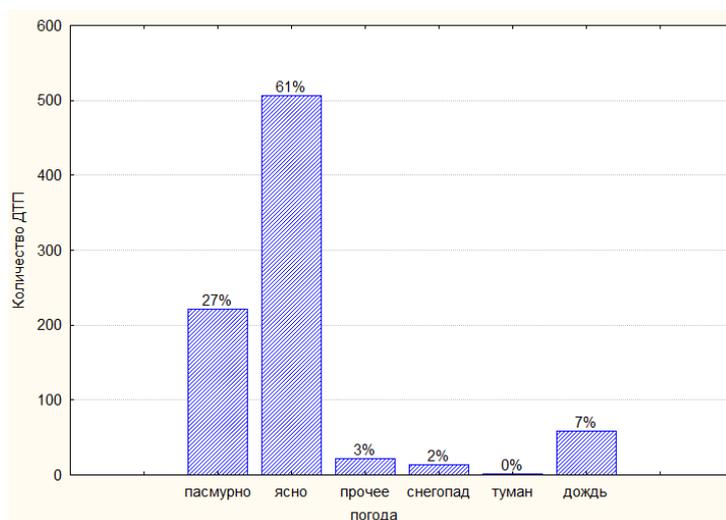


Рисунок 4. – Гистограмма для переменной «Погодные условия»

В данном случае значимым является независимый фактор, характеризующий состояние проезжей части, – коэффициент сцепления шин с дорогой.

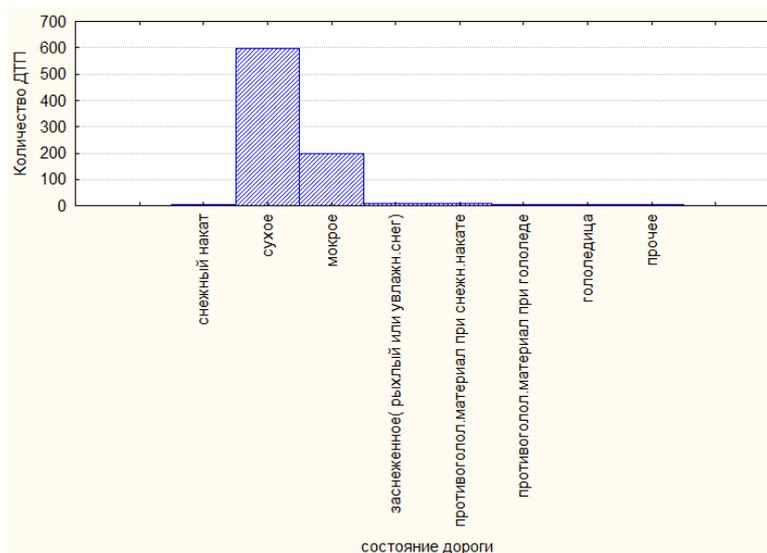


Рисунок 5. – Гистограмма для переменной «Состояние проезжей части»

Кроме того, вероятность травмирования участников ДТП на сухом и мокром покрытии примерно одинакова.

3 этап. Структурный анализ индикаторов для комплексного показателя аварийных ситуаций. Главная задача данного этапа – выявление факторов, влияющих на число пострадавших при аварии.

Обобщенной задачей является разработка математической модели, которая объясняла бы количество раненых и погибших при ДТП под влиянием факторов внешней среды [5; 6]. Поскольку не все статистически значимые данные доступны в исходной таблице, построение такой многофакторной модели становится сложной задачей, при решении которой возможно нахождение общих закономерностей,

определяющих высокое или низкое количество пострадавших [7; 8]. Работа с большим числом предикторов малопродуктивна, лишние переменные затрудняют поиск истинной зависимости. На рисунке 6 представлен результат отбора наиболее значимых факторов из массива независимых переменных, потенциально влияющих на результат.

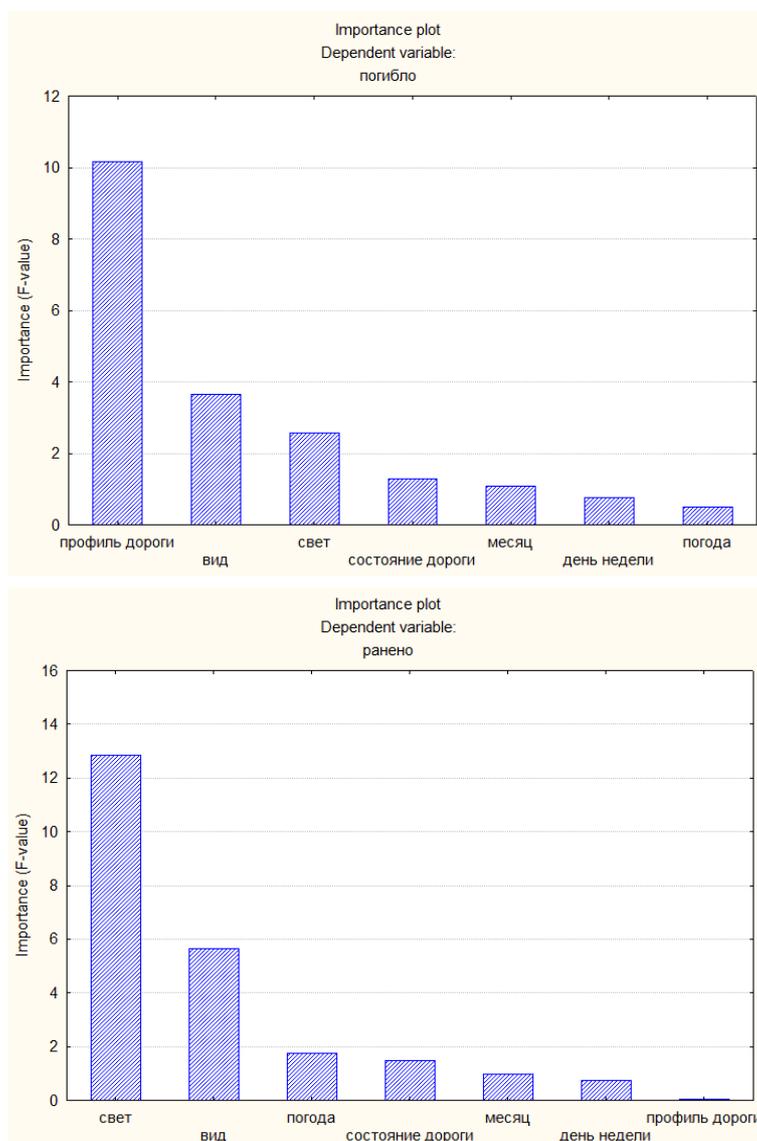


Рисунок 6. – График важности предикторов для переменных «Погибло» и «Ранено»

Методами дисперсионного анализа исследовались факторы, влияющие на аварийность. В качестве предикторов приняты переменные из числа отобранных при отсеве признаков. Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4. – Результаты дисперсионного анализа для переменных «Погибло» и «Ранено»

Dependet Variable	Test of SS Whole vs. SS Residual										
	Multiple R	Multiple R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	SS model	df model	MS model	SS Residual	df Residual	MS Residual	F	p
Погибло	0,2378	0,0566	0,0209	6,9492	30	0,2316	115,8934	795	0,1458	1,5890	0,0243
Ранено	0,2743	0,0752	0,0403	26,4887	30	0,8830	325,6335	795	0,4096	2,1556	0,0004

Проведенные исследования позволили выделить ряд факторов, влияющих на общее количество погибших и раненых. Установлено, что на критерии «Погибло» и «Ранено» оказывают влияние такие переменные, как «Профиль дороги», «Освещение», «Вид». На критерий «Погибло» – также переменная «Состояние дороги». На критерий «Ранено» – переменная «Интенсивность». Во всех случаях данное

влияние незначительно, о чем свидетельствуют низкие коэффициенты детерминации для категориальных данных и невысокие коэффициенты Спирмена. Переменные «Месяц», «День недели», «Погодные условия» не оказывают значимого влияния на число погибших и раненых.

При этом следует отметить, что вышеуказанные факторы сами по себе являются комплексными [9] и оказывают влияние на численное значение ряда показателей, таких как интенсивность дорожного движения, скорость автомобиля, расстояние видимости и коэффициенты продольного и поперечного сцепления шин с дорогой, которые, к сожалению, в настоящее время не регистрируются при ДТП [10].

Проведенные исследования не дают окончательного ответа на вопрос о модели, определяющей количество ДТП и тяжесть их последствий, а также степени влияния каждого фактора. Для проведения детальных исследований и более глубокого анализа с целью выявления характера влияния данных факторов на количество пострадавших целесообразно перейти к относительным величинам в дальнейшей работе.

На основании этих выводов предлагается построение комплексной оценки показателя аварийной ситуации в виде иерархической структуры, которая включает в себя целевой, критериальный, индикаторный уровни. Целевой уровень показывает, что риск аварии зависит от комбинации критериев по частоте аварийных ситуаций, степени тяжести ДТП и определяющего тренда аварии.

**Заключение.** Данное исследование направлено на разработку проактивной системы обеспечения безопасности дорожного движения. Группу выявленных основных факторов можно рассматривать как набор индикаторов повышенного риска возникновения ДТП с различной степенью тяжести, входящий составной частью в комплексный показатель аварийной ситуации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аудит безопасности дорожного движения / Д.В. Капский [и др.] ; науч. ред. Д.В. Капский. – Гомель : БелГУТ, 2015. – 428 с.
2. Врубель, Ю.А. Определение потерь в дорожном движении / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский, Е.Н. Кот. – Минск : БНТУ, 2006. – 240 с.
3. Харин, Ю.С. Математические и компьютерные основы статистического анализа данных и моделирования : учеб. / Ю.С. Харин, В.И. Малюгин, М.С. Абрамович. – Минск : БГУ, 2008. – 455 с.
4. Скиркоуский, С.В. Оценка безопасности дорожного движения на этапах проектирования транспортной сети / С.В. Скиркоуский, 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.
5. Kapski, D. Theoretical principles of forecasting accident rate in the conflict section of the cities by the method of potential danger / D. Kapski, I. Leonovich, K. Ratkeviciūtė // The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. – 2007. – Vol. II, № 3. – P. 133–140.
6. Identification of Hazardous Road Sections: Crash Data versus Composite Index Method / Intan Suhana M. R. [et al.] // IACSIT International Journal of Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 6, No. 6. – P. 481–486.
7. Łukasik, Z. Safety and risk in road traffic: selected problems / Z. Łukasik, A. Szymanek // Transport Problems. – 2012. – Vol. 7, No. 2. – P. 83–94.
8. Эльвик, Р. Справочник по безопасности дорожного движения : [пер. с норв.] / Р. Эльвик, А. Боргер Мюсен, Т. Ваа ; под ред. проф. В.В. Сильянова. – М. : МАДИ (ГТУ), 2001. – 754 с.
9. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса : материалы I Всерос. науч.-практ. (заоч.) конф. с междунар. участием / под общ. ред. И.А. Якубович. – Магадан : Изд-во СВГУ, 2011. – 300 с.
10. Капский, Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении / Д.В. Капский. – Минск : БНТУ, 2008. – 243 с.

Поступила 02.11.2020

#### CREATING A HIERARCHICAL SYSTEM OF INDICATORS FOR A COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF EMERGENCY SITUATIONS

S. SKIRKOUSKI, A. NEUZORAVA

*The research is aimed at identifying basic indicators in the form of variables for analyzing emergency situations in urban conditions from a multi-factor point of view. It is established that out of nine indicator variables, six are the determining ones, on the basis of which a hierarchical system of indicators is built for a comprehensive assessment of emergency situations. The results obtained can be used in the development of a proactive road safety system.*

**Keyword:** emergency, traffic accident, variables, indicators.

УДК 629.3.082.2

**КОМПОЗИЦИОННЫЕ ЦЕНТРЫ В КОМПОНОВКАХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОРПУСОВ  
АВТОТРАНСПОРТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

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

*Впервые в проектную практику введено понятие композиционного центра в компоновке производственного корпуса автотранспортного предприятия. Использование его в проектных работах при реконструкции и техническом перевооружении производственных участков с процедурой оптимизации позволяет получать компоновку корпуса с минимальной производственной площадью и наименьшей транспортной работой по перемещению обслуживаемых или ремонтируемых изделий.*

**Ключевые слова:** автотранспортное предприятие, производственный корпус, компоновка, композиционный центр, оптимизация.

**Введение.** В зависимости от принадлежности автотранспортных средств предприятию и выполняемых производственных функций автотранспортные предприятия (АТП) подразделяют на автоэксплуатационные, автообслуживающие и авторемонтные [1; 2]. Автоэксплуатационные предприятия (АЭП) выполняют перевозку грузов и пассажиров собственным или арендованным парком подвижного состава с его межменным хранением, техническим обслуживанием и текущим ремонтом. Автообслуживающие предприятия (АОП) выполняют услуги, связанные с хранением, техническим обслуживанием, текущим ремонтом и заправкой топливом, маслами, технологическими жидкостями и сжатым воздухом любых транспортных средств – как приписанных к данному экономическому региону, так и следующих через него (транзитных), как принадлежащих предприятиям, так и отдельным гражданам. Авторемонтные предприятия (АРП) в большинстве случаев специализированы по оказанию услуг. Предприятия выполняют все виды ремонта автомобилей (агрегатов) с восстановлением их деталей. К АРП относят авторемонтные и агрегаторемонтные заводы и мастерские, кузовно-, шино- и электроремонтные мастерские. Для выполнения однородных работ, связанных с содержанием автотранспортных средств в исправном состоянии, на предприятии создают соответствующие производственные участки (зоны, отделения).

Компоновка производственного корпуса – это горизонтальный разрез производственного здания по уровню окон в установленном масштабе, захватывающий прилегающую территорию и включающий: изображения элементов здания (колонны с координационными осями, стены и перегородки, дверные и оконные проемы, лестницы, антресоли, подвалы и подпольные каналы с кабелями и трубопроводами); производственные (основные и вспомогательные), административные, бытовые и складские помещения; вентиляционные камеры, трансформаторные подстанции, пункты ввода холодной и горячей воды и пара; магистральные проезды; цеховые подъемно-транспортные средства, поточные линии, конвейеры и крупное оборудование. В проемах наружных стен здания показывают направления въезда и выезда транспорта.

Компоновочное решение производственного здания подчинено технологическим требованиям, ограничениям по безопасности труда и обусловлено рациональным расположением участков, минимальной транспортной работой по перемещению обслуживаемых (ремонтируемых) изделий, а также организацией движения людских потоков. При компоновании производственного корпуса учитывают следующее:

- все производственные основные и обслуживающие участки желательно разместить в одном производственном корпусе (кроме участка с моечно-уборочными работами при ежедневном обслуживании (ЕО) автомобилей). Если это невозможно, то в отдельных зданиях размещают склады, участки вспомогательного и обслуживающего производства;

- все элементы здания должны соответствовать нормам строительного проектирования, правилам охраны труда и противопожарным ограничениям. Площадь помещений должна быть более 10 м<sup>2</sup>, а их ширина – не менее 3 м (для обеспечения необходимых условий труда);

- все производственные помещения должны иметь естественное освещение. Складские помещения могут его не иметь. При длине помещения до 12 м ограничиваются боковым освещением через оконные проемы в стенах, при большей длине необходимо комбинированное освещение через проемы в стенах и фонари в крыше здания. Помещения, расположенные во внутренней части здания, должны иметь фонари;

- тепловые участки (сварочный, кузнечный, термический и др.) объединяют в блок, который выделяют несгораемыми стенами и располагают вместе у наружных стен здания преимущественно с северной стороны. Рядом с пожароопасными участками не допускается расположение участков с легковоспламеняющимися материалами (обойным, окрасочным, деревообрабатывающим и др.);

– производственные участки и склады располагают в технологической последовательности с обеспечением минимальных расстояний для перемещения грузов;

– все производственные и складские помещения должны иметь сообщение между собой по внутренним проходам здания. Если к складским помещениям (кроме склада масел) нельзя обеспечить удобный внутренний подъезд, то предусматривают наружные ворота. Некоторые участки (обкаточный, кузнечный, окрасочный) должны иметь дополнительный выход наружу здания;

– предусматривают несколько взаимно перпендикулярных проездов (технологических и магистральных). Для въезда пожарных автомобилей планируют магистральные сквозные проезды, примыкающие к воротам. Число таких проездов выбирают из расчета, чтобы расстояние от проезда до любой точки внутри корпуса не превышало 50 м.

Здание должно иметь по возможности одинаковую сетку колонн, хотя в ряде случаев это приводит к технологическим неудобствам, усложнению планировок участков и нерациональному использованию производственной площади. Проще строить одноэтажное здание с одинаковой высотой всех помещений, однако с технологических позиций большая высота ряда помещений не будет востребована, а естественное освещение помещений, расположенных ближе к центру здания, будет затруднено. Поэтому высота средних пролетов здания обычно превышает высоту крайних пролетов. Кроме того, сетка колонн крайних пролетов, в которых размещают обслуживающие участки основного производства и участки вспомогательного производства, может быть более мелкогабаритной. При крупногабаритной сетке колонн помещения получаются длинными, что ухудшает расстановку оборудования и естественное освещение помещений. Однако для АЭП с большими автобусами желательно иметь производственный корпус с крупногабаритной сеткой колонн.

Учебные издания ориентируют будущих специалистов автомобильного транспорта при изучении дисциплины по проектированию предприятий на оптимизацию технических решений по критериям минимальных производственной площади и транспортной работы, но качественных и количественных методов этой оптимизации не предлагают [3–5].

**Цель работы** – выработать мероприятия, обеспечивающие снижение производственной площади и транспортной работы по перемещению обслуживаемых и ремонтируемых изделий при реконструкции и техническом перевооружении производственных участков автотранспортных предприятий.

**Основная часть.** *Композиционный центр* – это производственный участок, связанный с другими участками наибольшей массой перемещаемых изделий и материалов (грузопотоком, выраженным в тоннах), на котором выполняют наибольший объем работ (выраженный трудоемкостью в чел.-ч). Грузопоток между участками определяется массой перемещаемых грузов, а расчет трудоемкости работ выполняют путем расчета производственной программы участков и использования нормативных и корректирующих сведений ТКП 248-2010 [6].

Композиционным центром производственного корпуса АЭП и комплексного АОП служит участок постового текущего ремонта (ТР) автомобилей, с которым связаны специализированные участки ремонта частей автомобилей и соответствующие склады [2]. Специализированные участки ориентируют и располагают вокруг участка постового ТР. В других подходящих местах производственного корпуса располагают участки диагностирования и технического обслуживания. Причем участок ЕО с большим объемом моечных работ с очистным раствором и установками для его регенерации желательно расположить в отдельном здании.

Изучение направленности и значений грузопотоков между самими участками и участками и складами в производственном корпусе АЭП или АОП дает возможность оптимальным образом расположить основные части корпуса относительно друг друга.

Матрица функциональных связей в виде наличия и направленности грузопотоков (рисунок 1) позволяет качественно оценить факт тяготения одних частей корпуса к другим (знаки + в матрице обозначают присутствие таких связей). Чем больше знаков + в строке, тем большее количество подразделений тяготеют к подразделению, название которого вписано в строку матрицы.

Количественную картину функциональных связей одного участка с другим описывает коэффициент тяготения  $k_m$

$$k_m = \frac{\sum_1^n G_{\text{ч}}}{G_{\text{а}}},$$

где  $G_{\text{ч}}$  – вес  $n$  частей автомобиля (материалов), перемещаемых между участками или участками и складами в течение года, кг;

$G_{\text{а}}$  – вес автомобилей, которые проходят ТО и ТР в производственном корпусе в течение года, кг.

Участки и склады – поставщики грузов (изделий и материалов)	Участки и склады – получатели грузов (изделий и материалов)																
	ТР постовой	Агрегатный	Механический	Кузнечно-рессорный	Кузовной	Электротехнический	Аккумуляторный	Медницкий	Топливный	Малярный	Шиноремонтный	Деревообрабатывающий	Диагностический	ТО-1	ТО-2	Склад масел	Склад ЗЧ и агрегатов
ТР постовой		+	+	+		+	+	+	+		+					+	+
Агрегатный	+		+														+
Механический	+	+															
Кузнечно-рессорный	+																
Кузовной			+														
Электротехнический	+																
Аккумуляторный	+																
Медницкий	+																
Топливный	+																
Малярный																	
Шиноремонтный	+																
Деревообрабатывающий																	
Диагностический	+													+	+		
ТО-1	+															+	
ТО-2	+						+	+	+	+						+	
Склад масел	+													+	+		
Склад ЗЧ и агрегатов	+	+					+		+	+							

Рисунок 1. – Матрица отношений участков и складов автоэксплуатационного предприятия

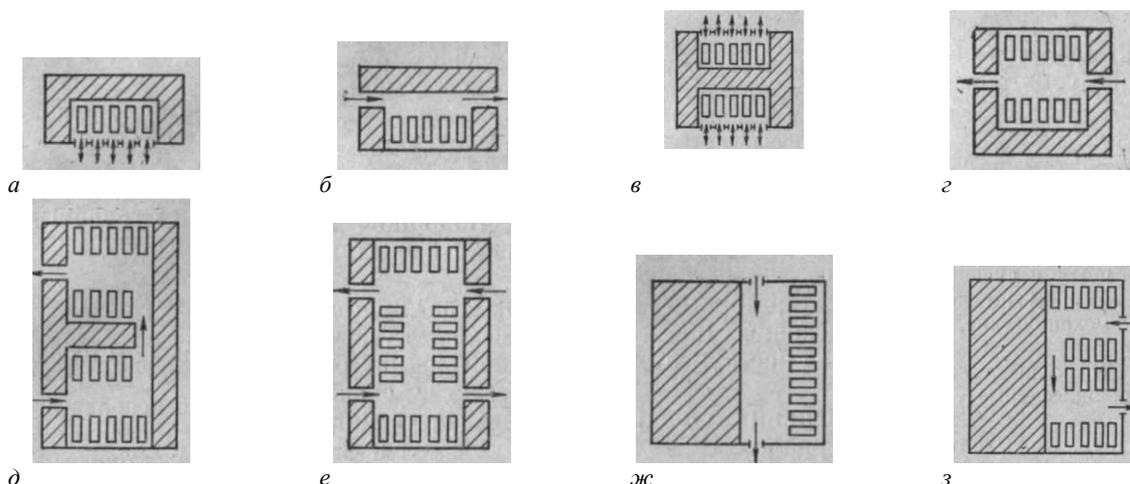
Участки-получатели изделий и материалов, в большей степени тяготеющие к участкам-поставщикам этих изделий и материалов (композиционным центрам), должны располагаться близко к последним. Это условие уменьшает объем транспортной работы по перемещению грузов между участками и между участками и складами.

Верхняя строка приведенной матрицы показывает, что к участку постового ТР тяготеет наибольшее число специализированных участков (агрегатный, механический, кузнечно-рессорный, электротехнический, аккумуляторный, медницкий, топливный, шиноремонтный), склады масел, запасных частей и агрегатов. К диагностическому участку тяготеют участки постового ТР, ТО-1 и ТО-2. На участках ТО-1 и ТО-2 время от времени выявляется необходимость ТР агрегатов автомобилей. Склад масел в большом объеме обслуживает участок ТО-1 и в меньшем – участок ТО-2 и постового ТР. В складе масел хранят также и отработавшие масла. Склад запасных частей и агрегатов обслуживает участки постового ТР, агрегатный, электротехнический, медницкий и топливный. Отремонтированные агрегаты, зачисленные в оборотный фонд при агрегатном методе ремонта, поступают из агрегатного участка на склад запасных частей и агрегатов.

Относительно самостоятельными, слабо связанными с остальными, являются участки кузовной с рабочими местами сварки, малярный и деревообрабатывающий. Эти участки могут располагаться удаленно от других участков.

Участок ЕО нерационально располагать в общем производственном корпусе по следующим причинам. Во-первых, он функционально слабо связан с остальными участками АЭП, во-вторых, наличие большого объема моечных работ пагубно влияет на долговечность указанного здания.

На рисунке 2 показано влияние количества автомобилей в АЭП на расположение специализированных участков ТР относительно участка постового ТР. Рисунки 2, а–г характеризуют относительное расположение участков в АЭП с малым числом автомобилей, здесь наблюдается их расположение, близкое к оптимальному. Рисунки 2, д–е характеризуют предприятие с увеличенным числом автомобилей и практически с круговым расположением специализированных участков ТР относительно участка постового ТР. На рисунках 2, ж–з указанные участки расположены в смежных пролетах здания. Такое расположение характерно для АЭП с большим количеством автомобилей, хотя его нельзя признать оптимальным.

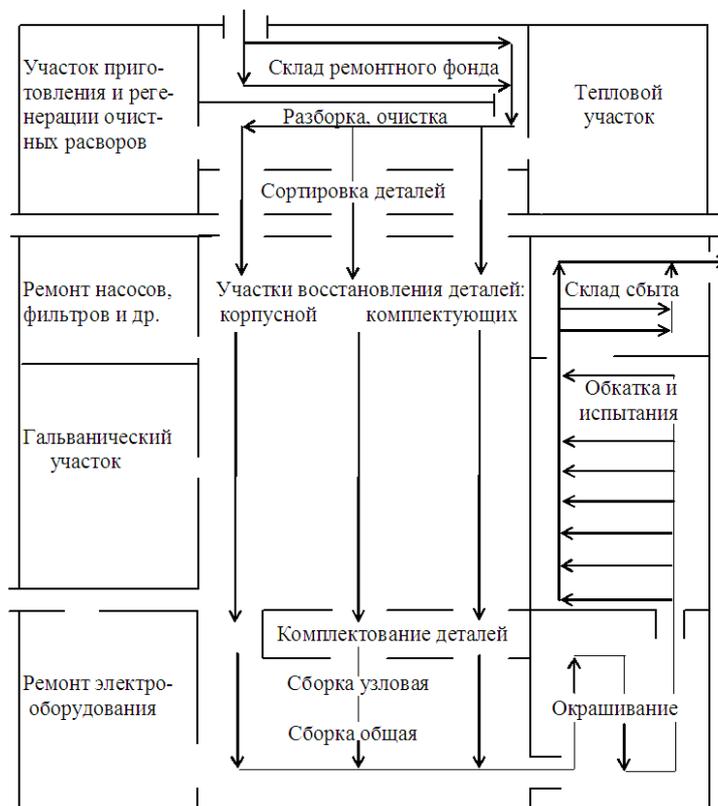


**а, б, в, г – одностороннее сообщение в одном пролете здания; д, е – двухстороннее сообщение в одном пролете здания; ж, з – сообщения в смежных пролетах здания**

**Рисунок 2. – Схемы расположения участков участкового ремонта и ТО относительно участка постового ремонта ТР с различными направлениями въезда и выезда автомобилей**

Участки номерных ТО, которые слабо связаны с участками текущего ремонта, можно располагать в других местах. Участки диагностирования располагают рядом с соответствующими участками ТО и ТР.

Производственные корпуса авторемонтных предприятий имеют по два композиционных центра – участок разборки и очистки автомобилей (агрегатов) и комплектовочно-сборочный. Через эти участки проходит вся масса ремонтируемых изделий, эти участки связаны с остальными производственными участками, на них приходится более половины трудоемкости ремонтных работ. Схема компоновки производственного корпуса агрегаторемонтного предприятия с наименьшими площадью, транспортной работой по перемещению изделий и потерей энергии представлена на рисунке 3.



**Рисунок 3. – Схема расположения производственных участков в производственном корпусе агрегаторемонтного завода**

**Заключение.** Предложено понятие композиционного центра в компоновке производственного корпуса автотранспортного предприятия. Использование его в проектных работах при реконструкции и техническом перевооружении производственных участков позволяет получать компоновку корпуса лаконичной с минимальной производственной площадью и наименьшей транспортной работой по перемещению обслуживаемых или ремонтируемых изделий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, В.П. Техническая эксплуатация автомобилей. Дипломное проектирование : учеб. пособие / В.П. Иванов. – Минск : Выш. шк., 2015. – 215 с.
2. Иванов, В.П. Повышение качества подготовки специалистов по технической эксплуатации автомобилей совершенствованием курса «Проектирование предприятий автомобильного транспорта» / В.П. Иванов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2020. – № 11. – С. 78–84.
3. Проектирование предприятий автомобильного транспорта : учеб. для вузов / М.М. Болбас [и др.] ; под ред. М.М. Болбаса. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2004. – 527 с.
4. Лежава, А.Г. Дипломное проектирование : метод. рекомендации / А.Г. Лежава, А.В. Колеченок, Е.В. Кузнецова. – Гродно : ГрГУ, 2011. – 42 с.
5. Савич, А.С. Проектирование предприятий по ремонту автомобилей : учеб. пособие для студентов / А.С. Савич. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2013. – 240 с.
6. Техническое обслуживание и ремонт автомобильных транспортных средств. Нормы и правила проведения : ТКП 248-2010 (02190). – Введ. 13.05.2010. – Минск : Транстехника, 2012. – 42 с.

*Поступила 28.12.2020*

#### COMPOSITION CENTERS IN PRODUCTION CASES LAYOUT MOTOR TRANSPORTATION COMPANIES

*V. IVANOV*

*For the first time, the concept of a composition center was introduced in the layout of the production building of a motor transport enterprise. Using it in design work during the reconstruction and technical re-equipment of production sites with an optimization procedure allows you to obtain a housing layout with a minimum production area and the least transport work for moving serviced or repaired products.*

**Keywords:** *motor transport enterprise, production building, layout, composition center, optimization.*

УДК 621.9.022.1

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ СЕДЕЛ КЛАПАНОВ В АВТОРЕМОНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

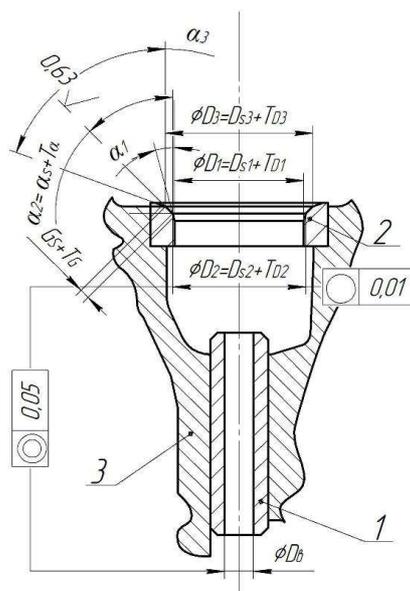
канд. техн. наук Г.А. ВЕРЕМЕЙ  
(Полоцкий государственный университет)

Представлены практические методы достижения точности и качества обрабатываемых поверхностей седел клапанов в газораспределительном механизме двигателя внутреннего сгорания. Проанализированы параметры точности и качества в сопряжении втулка–клапан–седло путем проведения размерного анализа конструкции и схемы обработки восстанавливаемых поверхностей седел клапанов. Представлены конструкторско-технологические решения для обеспечения жестких параметров точности и качества за счет реализации метода растачивания ориентируемой режущей пластиной в пространстве и схем базирования режущего инструмента с покрытием из кубического нитрида бора. Разработана конструкция станочного приспособления на пневматической подушке, позволяющая решить проблематику ориентации режущего инструмента при восстановлении седел клапанов в головках блоков цилиндров различных конструкций в авторемонтном производстве.

**Ключевые слова:** восстановительный ремонт, точность обработки, отклонение от круглости, шероховатость поверхности, процесс формообразования, параметры качества, седла клапанов.

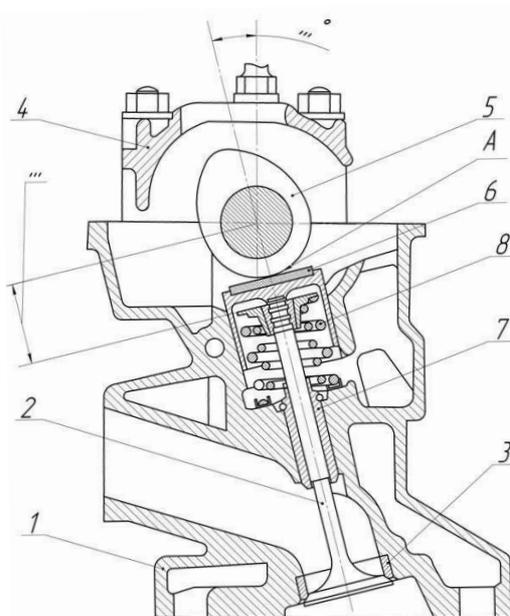
**Введение.** В современном авторемонтном производстве, в частности в отечественном, имеет место проблематика восстановления седел клапанов в газораспределительных механизмах (ГРМ) двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Связана она со следующими аспектами:

- параметры точности в сопряжении клапан–седло современных головок блоков цилиндров (ГБЦ) находятся в достаточно жестких пределах допусков (рисунок 1), обеспечение которых невозможно без применения специализированного металлорежущего оборудования;
- обеспечение качества поверхностей сопряжения клапан–седло представляет достаточно трудоемкий процесс, нуждающийся, как правило, в проведении финишной операции по притирке для достижения требуемой шероховатости;
- конструктивные особенности ГБЦ у многих производителей индивидуальны с точки зрения геометрического расположения оси вращения сопряжения «втулка-клапан-седло» в самой головке (рисунок 2), что требует разработки нестандартного приспособления, позволяющего взаимно ориентировать обрабатываемые поверхности и режущий инструмент (РИ) в пространстве.



1 – направляющая втулка клапана; 2 – седло клапана; 3 – головка блока двигателя

Рисунок 1. – Параметры точности восстановленного седла клапана  
(для автомобилей марки «ВАЗ»)



1 – головка блока ДВС; 2 – клапан; 3 – седло клапана; 4 – корпус подшипников распревала;  
5 – распревал; 6 – регулировочная шайба; 7 – направляющая втулка клапана

Рисунок 2. – Схема верхнеклапанного ГРМ

Цель работы – разработать технологическое оборудование и реализовать конструкторско-технологические методы, позволяющие обеспечить требуемые параметры точности и качества при восстановлении седел клапанов для ГБЦ широкого ассортимента в авторемонтном производстве.

**Анализ исследований и публикаций.** Накопленный опыт в сфере восстановления ГРМ, результаты исследований, проработка публикаций, архивов и патентных баз показали, что обработка седел клапанов является сложной технологической задачей [1]. В основном производстве она решается за счет использования специализированного оборудования на базе станков с CNC, эксплуатация которых в авторемонтном производстве экономически нецелесообразна.

В действующем авторемонтном производстве на сегодня в большинстве случаев в технологиях по восстановлению седел клапанов используется ручное оборудование (лезвийные головки типа компании «New Way» или шлифовальные машинки различных производителей), которые с переменной вероятностью успеха могут обеспечить жесткие параметры точности в сопряжении втулка–клапан–седло и требуют проведения финишной операции по притирке для достижения требуемой шероховатости [2].

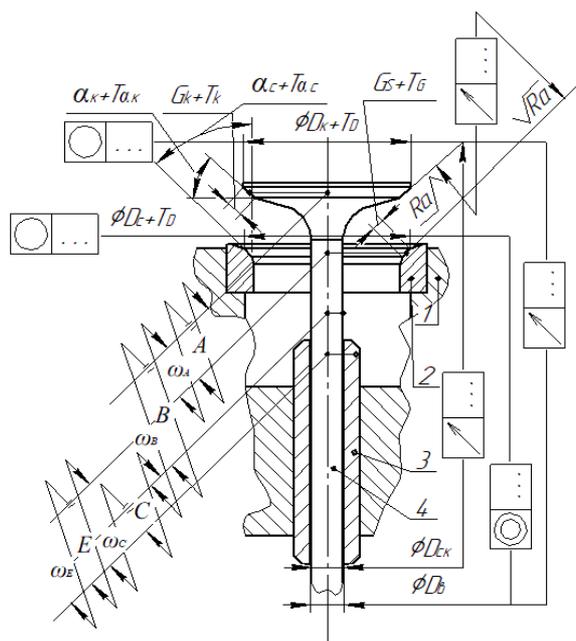
В машинных процессах восстановления седел большинство существующих станочных приспособлений для ориентирования ГБЦ в пространстве относительно режущего инструмента, представленных в патентных базах (в т.ч. бывшего СССР), не решают проблему совмещения конструкторских и технологических баз (базирования РИ по отверстию направляющей втулки клапана). Представленные полезные модели на изобретение конструктивно не ориентированы на обработку седла клапана под углом (см. рисунок 2) к привалочной плоскости ГБЦ (величина которого варьируется у разных автопроизводителей от 0 до 30°) и в большинстве представляют собой чрезмерно сложные технические устройства, изготовление которых для эксплуатации в авторемонтном производстве экономически не оправдано [2].

**Основная часть.** Данная работа базируется на представленных ранее результатах теоретических исследований в виде частных математических 3D-моделей процесса восстановления седел клапанов [3; 4], реализация которых требует проведения размерного анализа сопряжения втулка–клапан–седло.

Исследования проводились на примере верхнеклапанного ГРМ модели «ВАЗ».

Анализ конструкции ГРМ показывает, что качество соединения клапан–седло определяется основными параметрами: концентричностью поверхностей  $D_k$  и  $D_c$  (рисунок 3, таблицы 1, 2), их шероховатостью и величиной биения тарелки клапана в момент посадки его на седло, которая зависит от соосности данных поверхностей (параметр  $A$ ).

При анализе размерной цепи видно, что для достижения точности требуемого параметра  $A$  необходимо обеспечить соосность: тарелки клапана и его стержня (параметр  $B$ ), стержня клапана и цилиндрического отверстия втулки  $D_e$  (параметр  $C$ ), фаски седла  $D_c$  и отверстия  $D_e$  (параметр  $E$ ) [5].



1 – головка ДВС; 2 – седло клапана; 3 – направляющая втулка; 4 – клапан

Рисунок 3. – Параметры качества сопряжения поверхностей втулка–клапан–седло

Таблица 1. – Конструкторские допуски на параметры точности поверхностей в сопряжении втулка–клапан–седло

Элементы сопряжения втулка–клапан–седло	Диаметр, мм	Круглость, мм	Угол конусности, град	Шероховатость Ra, мкм	Ширина рабочей фаски, мм
Седло клапана	30,5+0,15	0,01	45°±5'	1,25	2–0,2
Направляющая втулка	8,03+0,02	0,005	–	2,5	–
Тарелка клапана	31,5–0,015	0,01	45°±5'	1,25	5+0,2
Стержень клапана	7,98+0,01	0,01	–	1,0	–

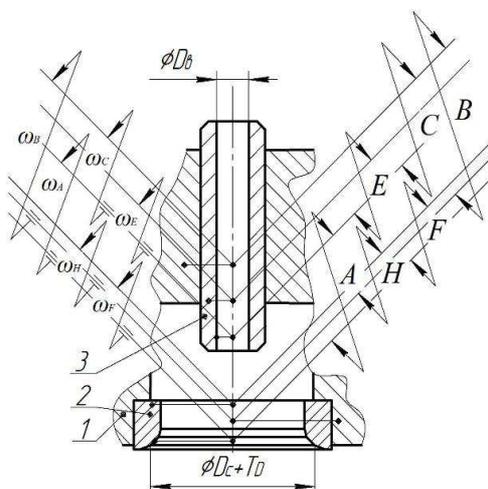
Таблица 2. – Конструкторские допуски на отклонения от соосности поверхностей контакта в сопряжении втулка–клапан–седло

Элементы сопряжения втулка–клапан–седло	Соосность радиальная, мм	Соосность угловая, град
Седло – направляющая втулка	0,05	0,028
Направляющая втулка – стержень клапана	0,05	–
Седло – тарелка клапана	0,05	0,035

Точность параметров *B* и *C* зависит от методов обработки и достигается на финишных операциях процесса обработки направляющей втулки и клапана. Для обеспечения точности параметра *A* основной технологической задачей является формирование соосности отверстия направляющей втулки и фаски седла клапана (параметр *E*), определяемой точностью их методов обработки и взаимной пространственной ориентацией элементов приспособления и режущего инструмента. При этом основной будет технологическая задача совмещения систем координат обрабатываемых деталей и РИ с минимальной погрешностью.

Если принять схему обработки поверхностей *D<sub>ε</sub>* и *D<sub>с</sub>* вне сборочной единицы (головки ДВС), то точность замыкающего звена будет достигнута в результате операции сборки направляющей втулки и седла клапана с головкой двигателя. Преимущества данного варианта – в простоте применения технологического оборудования, но, как показывает анализ размерной цепи (рисунок 4), точность параметра *A* будет зависеть от погрешности  $\omega_A$  всех предыдущих методов обработки и сборки направляющей втулки, клапана и его седла, т.е. от следующих погрешностей:  $\omega_B$  – расположения отверстий головки двигателя под запрессовку втулки и седла;  $\omega_C$  – операции сборки (запрессовки втулки в головке двигателя);  $\omega_E$  – расположения отверстия *D<sub>ε</sub>* относительно наружного диаметра втулки;  $\omega_F$  – расположения поверхности *D<sub>с</sub>* относительно наружной поверхности седла клапана;  $\omega_H$  – операции сборки (седла в головке двигателя). Но в таком случае величина замыкающего звена *A* окажется за пределами конструкторского допуска 0,05 мм, что указывает

на необходимость выбора обрабатываемых поверхностей  $D_6$  или  $D_c$  в качестве установочных технологических баз, когда втулка и седло находятся в сборе с головкой ДВС. Это позволит обеспечить точность параметра  $A$ , которая будет определяться погрешностями метода обработки и установки.



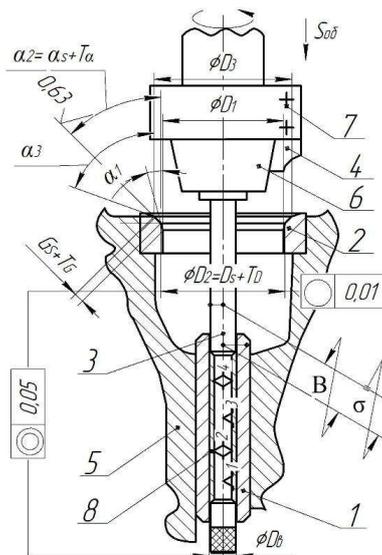
1 – головка ДВС; 2 – седло клапана; 3 – направляющая втулка

Рисунок 4. – Схема размерных связей поверхностей сопряжения клапан–седло

Поэтому базирование приспособления с режущим инструментом для обработки седла клапана необходимо производить по цилиндрическому отверстию направляющей втулки.

Выбор схемы базирования можно производить по двум вариантам: по отверстию направляющей втулки 1 или по его оси. При выборе схемы базирования по первому варианту приспособление в сборе с РИ будет ориентировано с технологическим зазором  $B$  и  $\sigma$  относительно обрабатываемой детали, что приведет к дополнительной погрешности базирования во время установки (рисунок 5). Для того чтобы повысить точность обработки, принимаем вариант базирования приспособления по оси направляющей втулки и в элементы конструкции включаем съемную, лепестковую разжимную цангу (рисунок 6, а), которая позволяет реализовать данную схему базирования и свести к нулю ее погрешность.

Проведем размерный анализ выбранной схемы при тонком растачивании седла клапана методом копирования с целью определения суммарной погрешности обработки (рисунок 7).

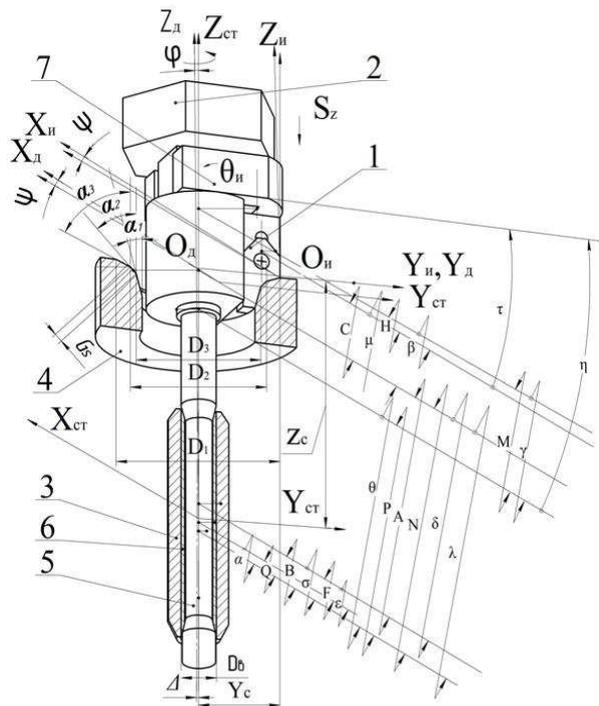


1 – направляющая втулка клапана; 2 – седло клапана; 3 – пилот приспособления; 4 – РИ; 5 – блок ДВС; 6 – шпindel приспособления; 7 – резцедержатель; 8 – съемная лепестковая цанга

Рисунок 5. – Схема базирования приспособления по оси втулки при растачивании и параметры точности седла клапана



Рисунок 6 – Самоцентрирующийся пилот со съемной лепестковой цангой (а), режущая профильная пластина (б)



1 – режущая пластина; 2 – шпиндель; 3 – направляющая втулка; 4 – седло клапана; 5 – пилот; 6 – цанговая оправка; 7 – резцедержатель; A, B, C, E, N, H, M, P, Q – параметры размерных цепей эксцентриситетов;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – углы конусности седла;  $\alpha, \lambda, \beta, \delta, \epsilon, \eta, \mu, \sigma, \tau, \gamma$  – параметры размерных цепей относительных поворотов;  $D_1, D_2, D_3$  – диаметральные размеры седла

Рисунок 7. – Технологические размерные цепи в схеме обработки седла клапана

Как видно, concentricity of the processed hole of the seat and the hole of the guide sleeve (in accordance with the design requirements (Figure 3, Table 2)) will be determined in two planes by the cumulative error of the parameter A in the radial direction and  $\delta$  in the angular (Figure 7) [6]:

$$\omega_{\text{Прад}} = \omega_y + \omega_n + \omega_{\text{мо}},$$

где  $\omega_{\text{мо}}$  – погрешность метода обработки;  
 $\omega_n$  – погрешность наладки технологического комплекса;  
 $\omega_y$  – погрешность установки, которая определяется как

$$\omega_y = \omega_{y\delta} + \omega_{y\text{ри}},$$

где  $\omega_{y\delta}$  – погрешность установки детали (в нашем случае  $\omega_{y\delta} = 0$ , т.к. ориентация инструмента осуществляется относительно детали без совмещения их систем координат с системой координат станка);  
 $\omega_{y\text{ри}}$  – погрешность установки РИ относительно обрабатываемой детали [7]:

$$\omega_{y\text{ри}} = \sqrt{k_1^2 \omega_{\text{бри}}^2 + k_2^2 \omega_3^2 + k_3^2 \omega_{\text{бпр}}^2 + k_4^2 \omega_{\text{пр}}^2},$$

где  $\omega_{\text{бри}}$  – погрешность базирования РИ в приспособлении (параметры  $N$  и  $\lambda$  (см. рисунок 7));  
 $\omega_3$  – погрешность закрепления РИ;  
 $\omega_{\text{бпр}}$  – погрешность базирования приспособления (для данной схемы обработки равна погрешности базирования (параметры  $B$  и  $\sigma$ ) пилота относительно направляющей втулки);  
 $\omega_{\text{пр}} = 0,002$  мм – погрешность ориентации шпинделя приспособления в подшипниках шаровой опоры;  
 $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = 1,2$  – коэффициенты, характеризующие законы распределения составляющих погрешностей.

Погрешности  $\omega_{\text{бри}}$  и  $\omega_{\text{бпр}}$  подлежат расчету, исходя из размерных цепей радиальных и угловых отклонений от концентричности. При этом точность радиального и углового расположения РИ относительно приспособления и последнего относительно направляющей втулки в двух плоскостях определяется следующими звеньями цепей, соответственно, для радиальных и угловых отклонений:  $C$ ,  $\mu$  – режущей кромки пластины относительно ее установочных баз;  $H$ ,  $\beta$ ,  $\tau$  – установочных поверхностей пластины в резцедержателе;  $M$ ,  $\gamma$ ,  $\eta$  – установочных поверхностей резцедержателя в шпинделе приспособления к его базам;  $P$ ,  $\theta$  – оси шпинделя к оси направляющего пилота;  $Q$ ,  $\alpha$  – оси пилота к оси лепестковой цанги;  $F$ ,  $\varepsilon$  – оси лепестковой цанги к оси отверстия направляющей втулки.

Радиальное  $B$  и угловое  $\sigma$  отклонения равны нулю при базировании пилота по оси направляющей втулки с помощью разжимной цанги, т.е. погрешность  $\omega_{\text{бпр}} = 0$ .

При расчете погрешности  $\omega_{\text{бри}}$  воспользуемся методом максимума–минимума, который применяется в авторемонтном производстве для исключения вероятности появления брака [8].

Погрешность расположения РИ относительно пилота приспособления в радиальном направлении будет равна сумме погрешностей:

$$\omega_{\text{бри}} = \omega_N = \omega_C + \omega_H + \omega_Q + \omega_P + \omega_F + \omega_M, \quad (1.4)$$

из которых каждая численно принимается равной точности метода обработки, применяемого при изготовлении соответствующих элементов конструкции, т.е.  $\omega_C = \omega_H = \omega_Q = \omega_P = \omega_F = \omega_M \leq 0,002$  мм. Данные значения принимаются в качестве полученных результатов по точности обработки деталей приспособления при шлифовании на прецизионном оборудовании.

Тогда при  $\omega_{\text{бри}} = 6 \cdot 0,002 = 0,012$  мм и  $\omega_3 = 0,005$  мм [7] погрешность установки режущей пластины относительно обрабатываемой детали

$$\omega_{\text{ури}} = \sqrt{1,2^2(0,012^2 + 0,005^2 + 0^2 + 0,002^2)} = 0,016 \text{ мм.}$$

Общая погрешность установки  $\omega_y = \omega_{y0} + \omega_{\text{ури}} = 0 + 0,016 = 0,016$  мм.

Суммарная радиальная погрешность обработки методом тонкого растачивания при  $\omega_n = 0,005$  мм и  $\omega_{\text{мо}} = 0,002$  мм (погрешность метода обработки принимается равной точности метода обработки режущей кромки пластины)  $\omega_{\text{Прад}} = 0,016 + 0,005 + 0,002 = 0,023$  мм.

Отклонения от угловой соосности рассчитываются аналогично. После проведенных расчетов общей угловой погрешности установки РИ относительно седла клапана суммарная угловая погрешность обработки методом тонкого растачивания составила  $\omega_{\text{Пугл}} = 0,013^\circ$ .

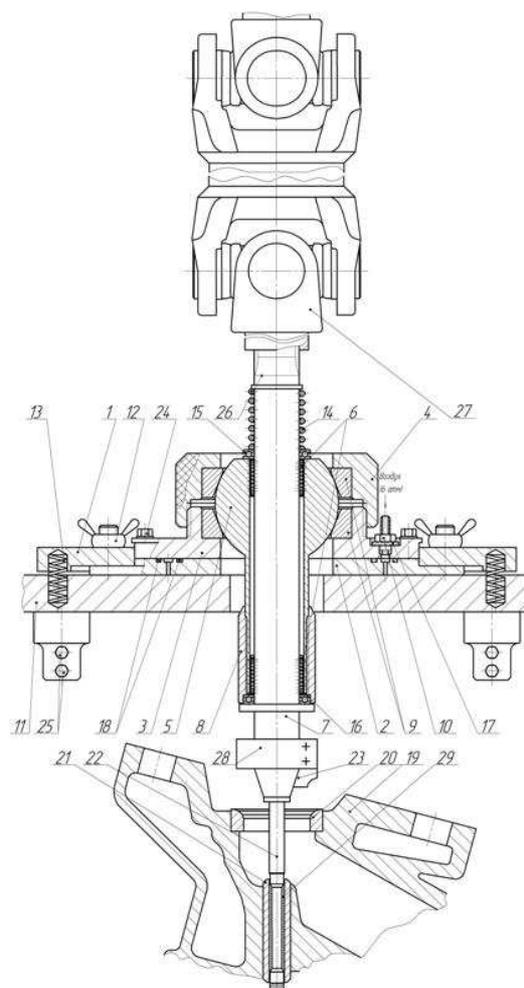
На основании рассчитанных значений отклонений радиальной и угловой погрешностей, которые находятся в пределах конструкторских допусков:  $\omega_{\text{Прад}} = 0,023 < 0,05$  мм и  $\omega_{\text{Пугл}} = 0,013^\circ < 0,028^\circ$ , принимаем схему обработки седла клапана по оси направляющей втулки клапана.

Для обеспечения заданных параметров точности принимаем метод тонкого растачивания (копированием) профильной пластиной (см. рисунок 6, б).

Материал режущей части РИ (согласно результатам измерений шероховатости обработанных поверхностей деталей и радиуса скругления режущей кромки пластины  $Ra < 0,6$  мкм,  $\rho = 9\text{--}11$  мкм [1]) соответствует аналогу композиционного эльборового покрытия пластины из кубического нитрида бора, что дает возможность лезвийным методом обработки на невысоких скоростях резания  $V < 100$  м/мин получать качество обработанной поверхности с высотой микронеровностей до 0,3 мкм [9].

В соответствии с поставленными задачами, выбранной схемой базирования и методом обработки было спроектировано и разработано приспособление для растачивания седел клапанов на пневматической подушке, ориентируемое относительно направляющей втулки головки ДВС и позволяющее производить обработку без совмещения системы координат станка с системами координат детали и инструмента (рисунок 8) [1].

Данное приспособление может быть монтировано на любом металлорежущем станке вертикально-фрезерной группы, состоит из двух основных сборочных единиц: устройства для базирования на пневмоподушке и приспособления для обработки седел клапанов, и работает следующим образом.



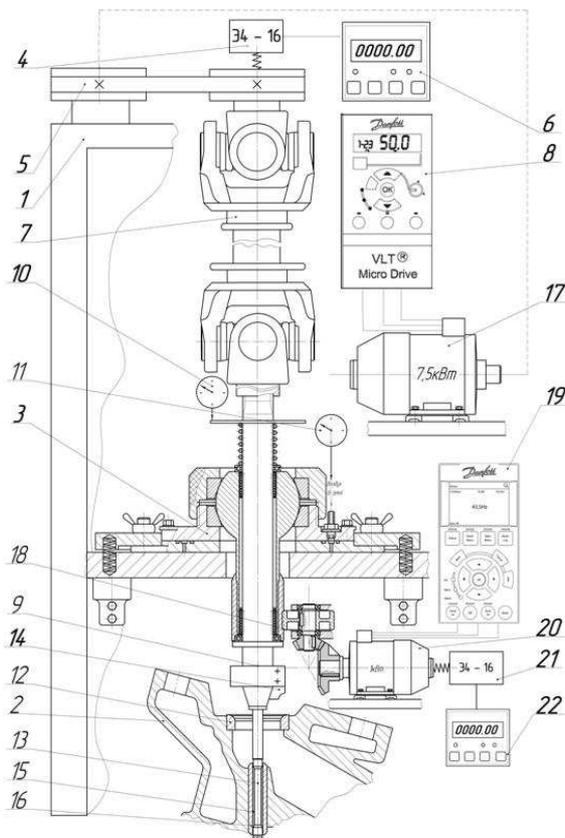
1 – планшайба; 2 – база подушки; 3 – корпус подушки; 4 – фиксатор опоры; 5 – опора шаровая; 6 – шариковая втулка; 7 – вал; 8 – приспособление подачи; 9 – подшипник скольжения радиально-упорный; 10 – штуцер пневматический; 11 – платформа несущая; 12 – фиксатор планшайбы винтовой; 13 – пружина планшайбы; 14 – пружина шпинделя; 15, 16 – подшипник радиальный; 17, 18 – уплотнение; 19 – головка блока цилиндров двигателя; 20 – седло клапана; 21 – направляющая втулка клапана; 22 – направляющий пилот; 23 – режущий инструмент; 24 – крепежные элементы подушки; 25 – крепежные элементы платформы; 26 – шлицевое соединение; 27 – карданный вал; 28 – резцедержатель; 29 – съемная лепестковая цанга

Рисунок 8. – Схема установки для обработки седел клапанов

Несущая платформа 11 монтируется с помощью крепежных болтов 25 в горизонтальном положении на жестких кронштейнах к станине станка, который имеет возможность линейного перемещения рабочего стола по трем координатам и одну координату для обеспечения вращательного движения шпинделя. Отклонение от горизонтальности платформы должно быть при этом в пределах допуска  $\pm 0,5$  мм. Головка блока цилиндров двигателя 19 располагается на столе станка согласно определенным требованиям точности.

Процесс обработки делится на два этапа: базирование устройства относительно заготовки и непосредственно процесс съема металла для получения трех конических поверхностей. Базирование вала 7 в сборе с шаровой опорой 5 (лишающей приспособление трех степеней свободы), на котором установлен резцедержатель 25, происходит на «плавающей» конструкции приспособления с пневматической подушкой (при включенном пневмоприводе с минимальным давлением 6 атм) по направляющей втулке 21 головки блока цилиндров двигателя 19 с помощью направляющего пилота 22 и съемной лепестковой цанги 29. После выполнения операции базирования при выключенном пневмоприводе шаровая опора 4 зажимается накидной гайкой 4, а база подушки 2 – винтовыми фиксаторами 12. Лепестковая цанга при этом снимается. Процесс обработки происходит за счет перемещения режущего инструмента 23 по оси вала 7 путем поворота приспособления подачи 8. Крутящий момент на вал 7 передается посредством клиноременной передачи и далее с помощью карданной передачи 27 через шлицевое соединение 26.

Общий вид всего комплекса для обработки седел клапанов на базе модернизированного вертикально-фрезерного станка модели 6P12 представлен на рисунке 9.



1 – станок 6P12; 2 – головка ДВС; 3 – приспособление на пневмоподушке; 4 – энкодер А; 5 – привод шпинделя приспособления; 6 – электронный тахометр А; 7 – карданная передача; 8 – электрический частотный вариатор; 9 – шпиндель приспособления для растачивания; 10 – индикатор подачи шпинделя; 11 – индикатор давления пневмоподушки; 12 – седло клапана; 13 – самоцентрирующий пилот; 14 – РИ; 15 – съемная лепестковая цанга; 16 – направляющая втулка клапана; 17 – двигатель привода шпинделя станка 6P12; 18 – привод подачи шпинделя приспособления; 19 – частотный преобразователь двигателя в приводе подачи; 20 – двигатель; 21 – энкодер Б; 22 – тахометр Б

Рисунок 9. – Комплекс для обработки седел клапанов

Крутящий момент от шпинделя станка на шпиндель приспособления 9 передается за счет клиноременной передачи 5.

Регулирование частоты вращения шпинделя осуществляется посредством электрического частотного вариатора 8, фиксирование – с помощью электронного тахометра 6.

Бесступенчатое регулирование оборотов шпинделя производится путем установки электрического частотного вариатора 8 с целью обеспечения регулирования частоты вращения в требуемом диапазоне с шагом  $1 \text{ мин}^{-1}$ . Определение частоты вращения электронным тахометром 6 с точностью  $\pm 1 \text{ мин}^{-1}$  осуществлялось с помощью энкодера 4 по частоте электрических импульсов.

Осевое перемещение шпинделя производится за счет привода подачи 18, а регулирование и фиксация частоты вращения вала электродвигателя 20 – с помощью энкодера 21 и электронного тахометра 22.

Величина перемещения шпинделя контролировалась с помощью индикатора часового типа 11 с точностью 0,01 мм.

**Заключение.** Представленные в работе практические методы позволяют достичь требуемой точности и качества восстановления седел клапанов без ручного вмешательства в формообразование обрабатываемых поверхностей, а выбранный эльборовый материал режущего инструмента – исключить трудоемкую операцию по их притирке.

Разработанная конструкция станочного приспособления на пневматической подушке за счет реализации метода растачивания ориентируемой режущей пластиной в пространстве и схем базирования по

оси отверстия направляющей втулки позволяет решить проблематику ориентации режущего инструмента с требуемой точностью при восстановлении седел клапанов в различных конструкциях ГБЦ в авторемонтном производстве.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кальченко В.И. Технологические методы достижения точности сопряжения «клапан-седло» в двигателе внутреннего сгорания / В.И. Кальченко, В.В. Кальченко, Г.А. Веремей // Автомобильный транспорт: проблемы и перспективы : материалы XIV междунар. науч.-техн. конф., Севастополь / СевНТУ. – 2011. – № 121. – С. 18–21.
2. Веремей, Г.А. Повышение эффективности процесса восстановления седел клапанов в авторемонтном производстве : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Г.А. Веремей. – Чернигов, 2015. – 183 л.
3. Zharii, Y. The geometry mathematical modeling of the overhauled valve-seat surfaces in the valve timing gear / Y. Zharii, H. Veremei. / Aviation in the XXI-st century : Materials of the sixth world congress, Kyiv, September 23–25. – 2014. – P. 17–21.
4. Модульное 3D-моделирование инструментов, процесса съема припуска и формообразования при растачивании седел клапанов ориентированной пластинкой / В.И. Кальченко [и др.] // Вестн. Черниг. гос. технол. ун-та. Сер. Техн. науки. – 2015. – № 2 (78). – С. 51–59.
5. Веремей, Г.А. Анализ размерных связей поверхностей контакта деталей в двигателях внутреннего сгорания / Г.А. Веремей // Комплексное обеспечения качества технологических процессов и систем : материалы I междунар. науч.-практ. конф., Чернигов / ЧГТУ. – 2011. – С. 88–89.
6. Веремей, Г.А. Технологические методы достижения качества в процессах формообразования рабочих поверхностей седла клапана / Г.А. Веремей // Комплексное обеспечение качества технологических процессов и систем : материалы IV междунар. науч.-практ. конф., Чернигов / ЧНТУ. – 2014. – С. 32–34.
7. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. Т. 2 / Ю.А. Абрамов [и др.] ; под ред. А.Г. Косилова, Р.К. Мещерякова. – 4-е изд. перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1985. – 495 с.
8. Бондаренко, С.Г. Основы технологии машиностроения / С.Г. Бондаренко. – Чернигов : ЧГТУ, 2005. – 567 с.
9. Залого, В.О. Инструментальные материалы для лезвийных инструментов : учеб. пособие / В.О. Залого. – Сумы : Изд-во СумГУ, 2007. – 206 с.
10. Веремей, Г.А. Усовершенствование оборудования для восстановительного ремонта седел клапанов в газораспределительных механизмах / Г.А. Веремей // Вестн. инженер. акад. Украины. – 2014. – № 2. – С. 37–41.

Поступила 16.11.2020

**PRECISION ENSURING AT THE VALVE SEATS OVERHAUL  
IN THE VEHICLE REPAIR MANUFACTURE**

**G. VEREMEY**

*The practical methods of precision achieving and quality of valve seats machined surfaces of in the valve timing gear of an internal combustion engine were presented. The parameters of accuracy and quality in the "sleeve-valve-seat" conjunction are analysed by carrying out a dimensional analysis of the structure and processing scheme of the valve seats overhauled surfaces. Design and technological solutions were presented to ensure strict parameters of precision and quality through the implementation of the boring with an orientable cutting insert in space method and the schemes for locating the cutting tool coated with cubic boron nitride. The machine construction device on a pneumatic cushion has been developed, which allows solving the problem of the cutting tool orientation when processing valve seats in the heads various constructions of cylinder blocks in the vehicle repair industry.*

**Keywords:** *overhaul process, machining precision, deviation from roundness, surface roughness, formation process, quality parameters, valve-seats.*

УДК 621.793

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЯ ШТОКОВ СИЛОВЫХ ГИДРОЦИЛИНДРОВ**

**д-р техн. наук, проф. М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ**  
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск),  
**канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН**  
(Полоцкий государственный университет),  
**А.П. ЯЛОВИК**  
(ОАО «Нефтезаводмонтаж», Новополоцк)

*Разработан технологический процесс восстановления штоков силовых гидроцилиндров строительно-дорожных машин гиперзвуковой металлизацией с последующим трибомодифицированием, рекомендуемый при ремонте штоков диаметром 30–120 мм, эксплуатирующихся в гидроцилиндрах с номинальным рабочим давлением от 10 до 22 МПа. Испытания показали, что износостойкость восстановленных по разработанной технологии рабочих поверхностей штоков выше, чем у новых, в 1,15–1,25 раза.*

**Ключевые слова:** восстановление штоков, гиперзвуковая металлизация, стендовые испытания.

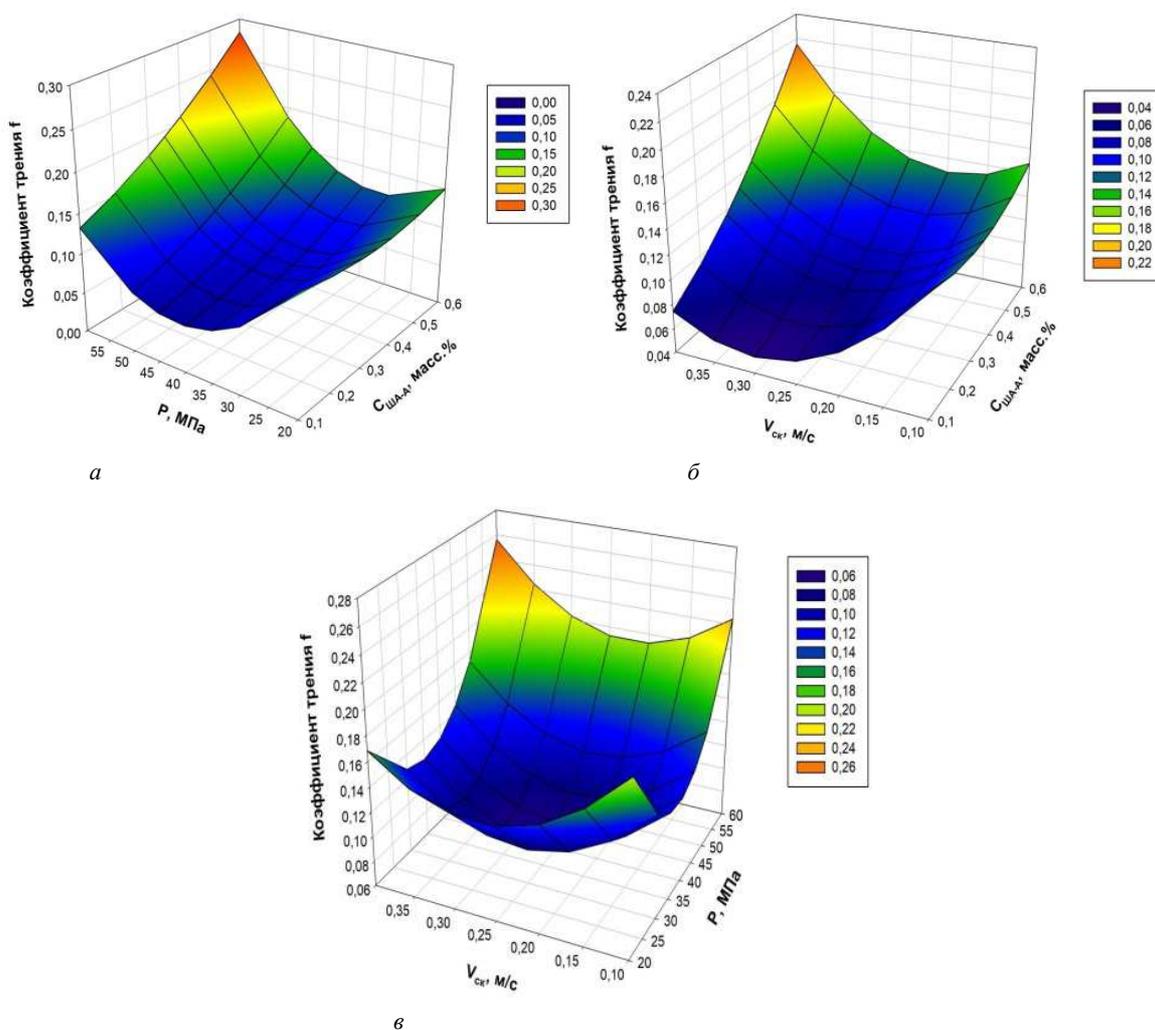
**Введение.** Тяжелые условия эксплуатации строительных и строительно-дорожных машин отрицательно сказываются на эффективности их использования, обусловленной выходом из строя быстроизнашивающихся деталей, в т.ч. компонентов гидропривода, среди которых одним из наиболее интенсивно изнашивающихся и дорогостоящих элементов является шток. Ежегодные суммарные затраты в Республике Беларусь на ремонт гидроцилиндров и приобретение новых штоков различных типов только для строительно-дорожных машин составляют более 600 тыс. долл. США.

Выполненные в Полоцком государственном университете и Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси исследования показали, что для восстановления штоков целесообразно использовать метод гиперзвуковой металлизации (ГМ), который в настоящее время является одним из наиболее эффективных и экономичных приемов формирования коррозионностойких и износостойких покрытий [1]. Проанализирован эффект трибомеханического модифицирования поверхности трения, наблюдаемый в процессе фрикционного взаимодействия пар трения в присутствии смазки с алмазно-графитовой наноразмерной добавкой (АМНД) и проявляющийся в существенном улучшении противоизносных и антифрикционных свойств трущихся поверхностей [2; 3]. Отмечена необходимость разработки процесса, позволяющего восстанавливать изношенные поверхности штоков силовых гидроцилиндров нанесением покрытий гиперзвуковой металлизацией с последующим трибомеханическим модифицированием [4].

**Основная часть.** *Определение режимов трибомодифицирования напыленных покрытий.* Характер протекания процесса трибомеханического модифицирования зависит от целого ряда факторов: свойств самих материалов, из которых изготовлены элементы трибосопряжения, параметров шероховатости поверхности трения, режимов трения, характеристик прирабочной композиции, включая концентрацию наноразмерного сверхтвердого модификатора в ней. Эффективность процесса трибомеханического модифицирования обычно оценивается по уровню повышения твердости (износостойкости) поверхности трения, степени снижения коэффициента трения и продолжительности стадии приработки трибосопряжения, фиксируемой по наступлению стабилизации коэффициента трения [5].

Определение режимов трибомеханической обработки газотермических покрытий и состав прирабочной композиции осуществлялись с учетом следующих экспериментальных данных, полученных в ходе триботехнических испытаний. Материалом покрытия являлся композит состава сталь 90Х18МФ – сталь 12Х18Н12Т, полученный гиперзвуковой металлизацией проволоками из мартенситной (90Х18МФ) и аустенитной (12Х18Н12Т) сталей с соотношением диаметров проволок  $D_1/D_2 = 1,20$ . Исходная шероховатость поверхности  $Ra = 0,63–0,80$  мкм. Основа прирабочной композиции – пластичная смазка Литол-24 (ГОСТ 21150-87), число пенетрации – 300 ед. Модифицирующая добавка – алмазно-графитовая шихта ША-А (ТУ РБ 1000561180.003-2003), размер частиц  $d_v = 10–50$  нм. Характеристика контртела: материал – сталь У8, твердость 64–65 HRC, исходная шероховатость поверхности  $Ra = 0,63–0,80$  мкм. Схема трибоконтакта – возвратно-поступательное перемещение контактирующих тел. Параметры оптимизации: концентрация добавки ША-А в смазке ( $C_{ША-А} = 0,10–0,60$  масс.%), давление в зоне трибоконтакта  $P = 20–60$  МПа и скорость скольжения в зоне трибоконтакта  $V_{ск} = 0,10–0,40$  м/с.

Анализ приведенных на рисунках 1–3 результатов показывает, что в случае использования приработочного состава с концентрацией алмазно-графитовой шихты в пределах  $C_{\text{ША-А}} = 0,25\text{--}0,50$  масс.% процесс приработки протекает достаточно интенсивно, и уже после пути трения  $L = 1000\text{--}1500$  м наступает стабилизация коэффициента трения. При использовании приработочной композиции с концентрацией алмазно-графитовой шихты  $C_{\text{ША-А}} < 0,25$  масс.% продолжительность процесса приработки рабочей поверхности газотермического покрытия чрезвычайно велика. Это обусловлено недостаточным содержанием в приработочном составе сверхтвердых частиц, обеспечивающих проявление эффекта трибомеханического модифицирования поверхности трения.



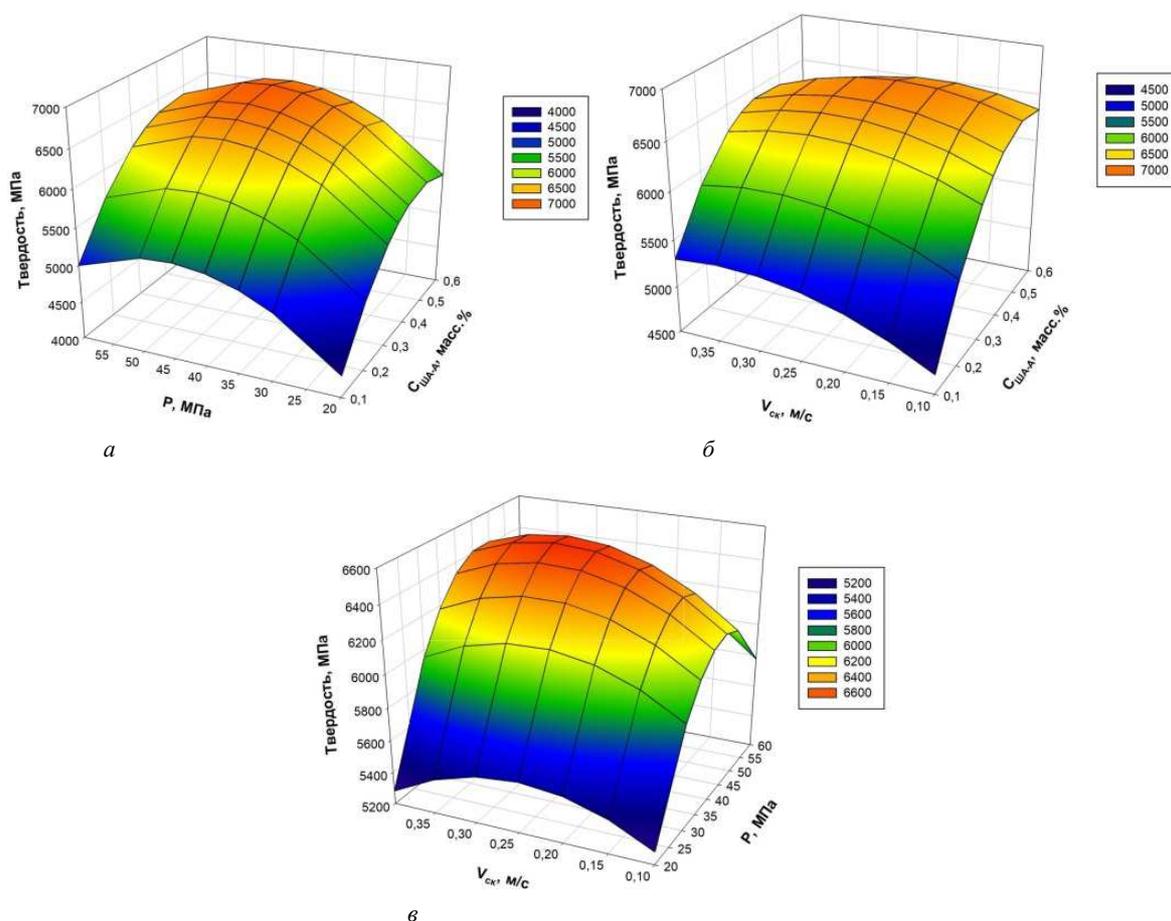
*a* – концентрации добавки  $C_{\text{ША-А}}$  и давление в контакте  $P$  (при  $V_{\text{СК}} = 0,25$  м);  
*б* – концентрация добавки  $C_{\text{ША-А}}$  и скорость скольжения  $V_{\text{СК}}$  (при  $P = 40$  МПа);  
*в* – давление в контакте  $P$  и скорость скольжения  $V_{\text{СК}}$  (при  $C_{\text{ША-А}} = 0,35$  масс.%)

Рисунок 1. – Зависимость коэффициента трения  $f$  исследуемых факторов процесса

При концентрации алмазно-графитовой шихты в смазке  $C_{\text{ША-А}} > 0,50$  масс.% на начальной стадии происходит резкое снижение коэффициента трения, однако через некоторое время наблюдается такое же резкое его увеличение с последующим наступлением задира. Это, вероятно, связано с чрезмерно повышенной вязкостью смазочной композиции при таком содержании в ней модификатора, ухудшением подтекания смазочного состава в зону трибоконтакта и нарушением условий смазывания пары трения. Наряду с этим повышенное содержание наноразмерной алмазно-графитовой шихты в смазочной композиции приводит к существенному увеличению стоимости последней.

Наиболее эффективно процесс трибомодифицирования поверхности трения для исследованных газотермических покрытий проявляется в диапазоне удельных нагрузок  $P = 40\text{--}50$  МПа при скорости

скольжения  $V_{ск} = 0,20-0,35$  м/с. При этих режимах стабилизация коэффициента трения на уровне  $f = 0,06-0,09$  наступает после приработки на пути трения  $L = 1480-1860$  м, твердость поверхностного слоя при этом увеличивается на 50–70%. При давлениях  $P < 40$  МПа стадия приработки протекает на пути трения более  $L = 3000$  м, повышение твердости поверхности составляет не более 10–25%, а коэффициент трения стабилизируется на уровне  $f = 0,10-0,12$ . При давлениях  $P > 50$  МПа уже на стадии приработки начинают проявляться явления задира с резким возрастанием коэффициента трения, обусловленные выдавливанием смазочного материала из зоны трения.

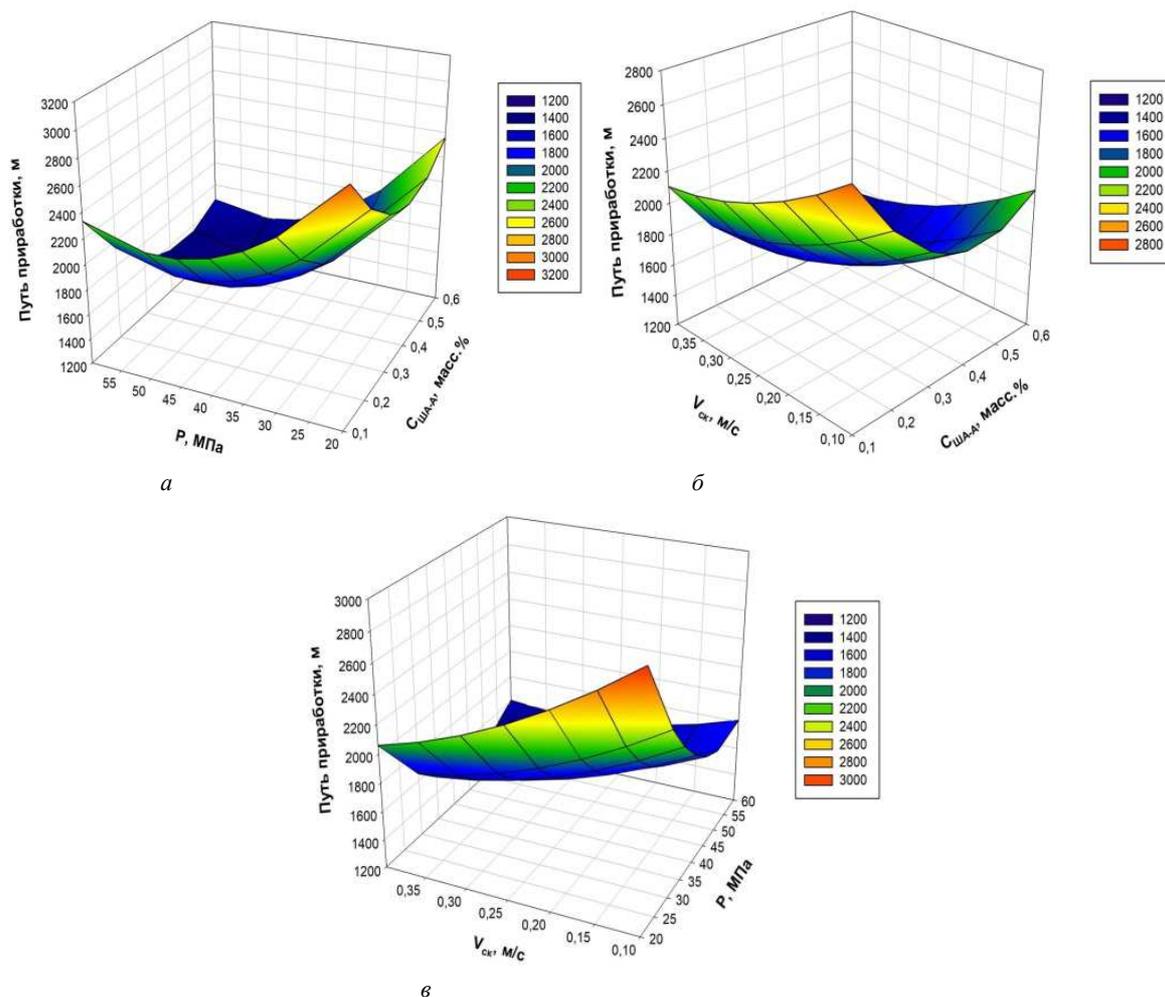


**а** – концентрации добавки  $C_{ША-А}$  и давление в контакте  $P$  (при  $V_{ск} = 0,25$  м);  
**б** – концентрация добавки  $C_{ША-А}$  и скорость скольжения  $V_{ск}$  (при  $P = 40$  МПа);  
**в** – давление в контакте  $P$  и скорость скольжения  $V_{ск}$  (при  $C_{ША-А} = 0,35$  масс. %)

**Рисунок 2.** – Зависимость твердости  $HV$  от исследуемых факторов процесса

Скорость скольжения в меньшей степени, чем удельная нагрузка, оказывает влияние на протекающие процессы модифицирования поверхности. Однако при значениях скорости скольжения  $V_{ск} < 0,20$  м/с отмечено замедленное протекание процессов приработки поверхности трения, которые завершаются после пути трения более  $L = 2500$  м с фиксацией коэффициента трения на уровне  $f = 0,09-0,11$  и повышением твердости поверхности покрытия на 30–40%. В случае проведения приработки при скорости скольжения  $V_{ск} > 0,35$  м/с наблюдается резкое повышение коэффициента трения, обусловленное, вероятно, процессами разрушения дисперсной фазы пластичного смазочного материала и вытеканием последнего из зоны трибоконтакта с последующим появлением задиры на поверхностях трения.

На основании полученных результатов можно заключить, что для обеспечения необходимого сочетания показателей трибомеханического модифицирования газотермических покрытий из композиции мартенситной и аустенитной сталей (коэффициент трения  $f = 0,06-0,08$ , твердость  $HV = 5900-6200$  МПа, путь трения  $L = 1500-1700$  м) режимы приработки должны входить в следующие диапазоны: концентрация добавки шихты ША-А  $C_{ША-А} = 0,30 \pm 0,05$  масс.%; давление в контакте  $P = 45 \pm 5$  МПа; скорость скольжения  $V_{ск} = 0,25 \pm 0,05$  м/с.



*а* – концентрации добавки  $C_{\text{ШЛА-А}}$  и давление в контакте  $P$  (при  $V_{\text{ск}} = 0,25$  м);  
*б* – концентрация добавки  $C_{\text{ШЛА-А}}$  и скорость скольжения  $V_{\text{ск}}$  (при  $P = 40$  МПа);  
*в* – давление в контакте  $P$  и скорость скольжения  $V_{\text{ск}}$  (при  $C_{\text{ШЛА-А}} = 0,35$  масс. %)

**Рисунок 3.** – Зависимость пути трения при приработке  $L$  от исследуемых факторов процесса

*Разработка технологического процесса.* Технологический процесс включает подготовку проволочных материалов для процесса гиперзвуковой металлизации, подготовку восстанавливаемой поверхности штока, нанесение покрытия гиперзвуковой металлизацией, шлифование покрытия, трибомодифицирование.

Для подготовки поверхности штоков использовали обдувку (струйно-абразивную обработку) в камере для струйно-абразивной обработки корундом или корундом в смеси с чугунной крошкой. Для этой цели применяли корунд с размером зерен 1,5 мм. По сравнению с пескоструйной очисткой производительность обработки с применением корунда на 10–30% выше. При отсутствии корунда можно применять стальную крошку или чугунную колотую дробь (твердость около 750 кг/мм<sup>2</sup>) с острыми углами и без ржавчины ДЧК 1 545 ГОСТ 11964-81. Учитывая, что поверхность штоков имеет твердость более 45HRC (после закалки), в колотую чугунную дробь добавляли корунд. Наилучшие результаты показывает обработка смесью дроби чугунной колотой ДЧК-1,8 ГОСТ 11964-81 с электрокорундом 1,7–1,4 ГОСТ 3647-80 в пропорции 1:1.

Режимы обработки: давление сжатого воздуха – 0,55–0,60 МПа; расход воздуха (ГОСТ 9.010-80) – 2,1–2,7 м<sup>3</sup>/мин; расстояние от среза сопла до обрабатываемой поверхности – 80–100 мм; угол наклона струи абразива к поверхности – 70–80°. Параметр шероховатости после обработки поверхности должен быть  $R_z = 40$ –60 мкм.

Подготовка проволоки заключалась в проверке сохранности упаковки проволоки, извлечении расходного материала из упаковки, устранении изгибов и загрязнений, а также установке бухт проволоки на подающие вертушки.

Для восстановления штоков использовали одновременное распрыскивание двух проволок: из стали 95Х18-Ш  $d = 2,0$  мм ТУ 1039–2012 и из стали 12Х18Н10Т  $d = 1,8$  мм ГОСТ 18143-72. Для реализации процесса гиперзвуковой металлизации использовали установку АДМ-10 (рисунок 4).

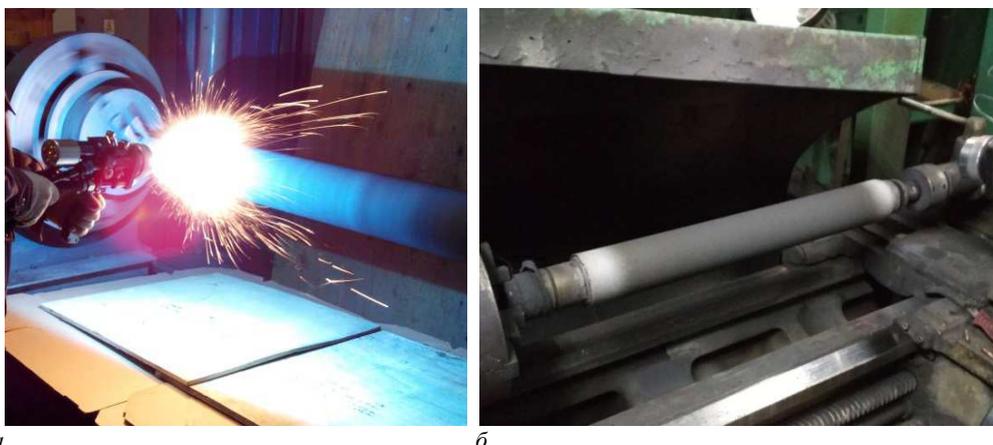


Рисунок 4. – Напыление покрытия (а) и шток после напыления (б)

Нанесение покрытия осуществляли при напряжении металлизации 32–34 В, при этом устанавливали скорость подачи проволок 3,2 м/мин, дистанцию напыления 170 мм. Расход воздуха составлял 1,75 м<sup>3</sup>/мин (105 м<sup>3</sup>/ч) при давлении 0,45–0,60 МПа, пропан-бутана – 0,9 м<sup>3</sup>/ч при давлении в 0,45 МПа. Используемая в камере сгорания металлизатора пропан-воздушная смесь подавалась с избытком пропана ( $\beta = 18–20$ ). Если в качестве горючего газа использовали газ МАФ, то его давление и расход составляли 0,37 МПа и 0,9 м<sup>3</sup>/ч. Частота вращения восстанавливаемого штока – 90 об/мин.

Толщина слоя наносимого покрытия зависит от глубины дефектов на восстанавливаемых штоках и составляет  $\delta = 1,0–1,8$  мм. После обработки шлифованием в номинальный размер рабочую поверхность смазывают смазкой ИТМОЛ-150Н, модифицированной шихтой ША-А ТУ РБ 1000561180.003-2003.

Разработанный технологический процесс восстановления штоков силовых гидроцилиндров монтажного оборудования гиперзвуковой металлизацией с последующим трибомодифицированием рекомендуется применять при ремонте штоков диаметром 30–120 мм, эксплуатирующихся в гидроцилиндрах с номинальным рабочим давлением от 10 до 22 МПа:

- штоки гидроцилиндров поршневого типа, двустороннего действия; например, типа Ц22А.000, которые устанавливаются на выносных опорах автомобильных кранов КС-3575А «Дрогобыч», а также на автокранах широкого модельного ряда «Ивановец» КС-3577, КС-3574, КС-35714, КС-35715 и их модификациях;

- штоки гидроцилиндров выдвижения телескопических стрел КС-3577, КС-35714-2.63.900-1 и др.;
- штоки гидроцилиндров Г-220.100.63.900 (аналог 73.04.000) ковша экскаватора ЕК-12;
- штоки гидроцилиндров ДЗ-122Б 08.05.000, предназначенные для подъема и опускания лопаты бульдозера и изменения угла резания автогрейдеров;

- штоки гидроцилиндров ELS-100.125.6000, КС-45719.63.900-01А выдвижения (втягивания) средней секции стрелы автокранов «Челябинец» КС-45721, КС-55730, «Галичанин» КС-4572А, КС-45719, КС-55713, КС-55729В;

- штоки гидроцилиндров КГЦ 321.3-100-710 подъема кузова тракторного прицепа 1ПТС-2 и др.

*Испытания восстановленных штоков.* Исходя из анализа конструкций стендов типа СГЦ-РСИ (ОАО «Гидроспецстенд», Москва) [6], СТИГ-10 (ОАО «Укрмашпром», Харьков) [7], КИ-28097М (ОАО «Автокапитал», Ярославль) [8], на которых осуществляются испытания гидроцилиндров с восстановленными штоками, а также требований ГОСТ 18464-96 «Гидроцилиндры. Правила приемки и методы испытаний», был изготовлен стенд для испытаний штоков, восстанавливаемых методом ГМ с последующим трибомеханическим модифицированием.

Схема стенда для испытания на герметичность по штоку представлена на рисунке 5. Стенд включает гидроцилиндр с испытываемым штоком (1), нагрузочный гидроцилиндр (2), двухпозиционный гидрораспределитель с гидравлическим управлением (3), трехпозиционный гидрораспределитель с электромагнитным управлением (4), нагрузочный насос (5), насос привода (6), гидробак (7), предохранительный гидроклапан (8), трехпозиционный гидрораспределитель с гидравлическим управлением (9), кран-демпфер (10), манометр (11), выключатель (12), динамометр (13).

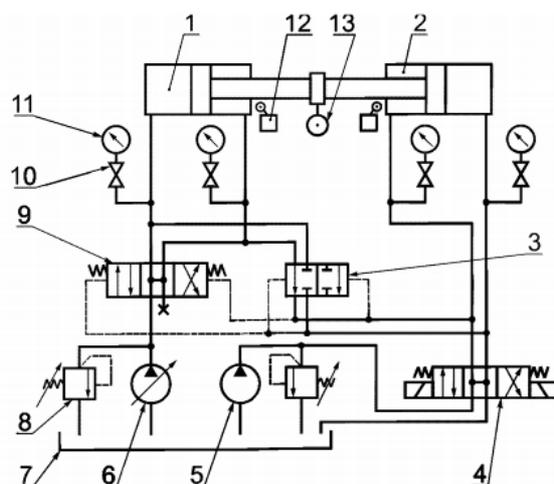


Рисунок 5. – Схема стенда для испытаний гидроцилиндров с восстановленными штоками

Работа на стенде проводится в ручном режиме. Максимальное давление в гидросистеме стенда – 25 МПа. Рабочая жидкость – масло М-10Г; температура рабочей жидкости при испытаниях –  $50 \pm 5$  °С; средние значения вязкости при температуре 50 °С – 65 сСт. Утечку рабочей жидкости (удельный объем выносимой рабочей жидкости) через уплотнитель плунжера проверяли при давлении 22 МПа.

Стендовые сравнительные испытания осуществлялись с новыми и восстановленными штоками гидроцилиндров выносных опор крана Ц22А.000. Сравнению подлежали характеристики следующих штоков: а) нового – сталь 40Х с последующим покрытием хромом; б) восстановленного в номинальный размер методом электродуговой металлизации распылением проволоки 95Х18; в) восстановленного в номинальный размер по разработанному технологическому процессу.

Перед испытанием и после него проводился микрометраж основных деталей гидроцилиндров, измерялись шероховатость поверхности штока и твердость по шкале Викерса. В процессе испытаний давление при страгивании определялось при постепенной подаче масла в поршневую полость с последующим повышением давления от 0 до давления начала перемещения поршня, которое фиксировалось манометром. Давление холостого хода определялось при поочередной подаче масла в обе полости гидроцилиндра. Наружная герметичность гидроцилиндра проверялась при максимальном давлении в гидросистеме 21,0 МПа, а также при давлении холостого хода 0,5 МПа.

Испытания проводились в объеме  $\tau = 100\ 000$  циклов, согласно рекомендациям [9; 10]. При испытании оценивались следующие параметры, характеризующие работоспособность гидроцилиндров: давление страгивания, давление холостого хода, наружная герметичность и внутренние утечки, интенсивность изнашивания (определялась методом искусственных баз).

Оценка параметров осуществлялась перед испытанием, после наработки  $1/3 \tau$ ,  $2/3 \tau$  и после полного  $\tau$ . При испытании использовалась рабочая жидкость – масло М-10Г, которое перед подачей подогревалось до температуры +50 °С. Температура рабочей жидкости контролировалась по термометру марки ТПГ-СК 0-160. Номинальная тонкость фильтрации рабочей жидкости при испытании составляла 120 мкм вместо паспортных значений 80 мкм, что позволило сократить продолжительность испытаний.

Измерение параметров гидроцилиндра осуществлялось со следующей точностью: давление – 1,5%, время – 0,5%, температура – 1%, расход жидкости – 1,5%, ход штока – 1%. Основной величиной, по которой оценивалось качество процесса восстановления, являлась износостойкость поверхности (таблица).

Таблица. – Значения интенсивности изнашивания поверхности испытываемых штоков

Продолжительность испытаний, циклов	Средняя интенсивность изнашивания за период испытаний, мкм/км		
	новый хромированный шток	восстановленный методом ЭДМ	восстановление методом ГМ + трибомодифицирование
$\tau = 33\ 000$	5,26	7,13	5,33
$\tau = 50\ 000$	4,95	7,01	4,88
$\tau = 100\ 000$	4,43	6,85	4,31

В ходе испытаний шток, восстановленный по разрабатываемой технологии, показал давление холостого хода, давление страгивания и герметичность на уровне нового.

Износостойкость восстановленной по разработанной технологии поверхности штока на первом этапе испытаний несколько уступала износостойкости нового штока (см. таблицу), затем износостойкость сравнялась, и в конце испытаний этот показатель стал выше у восстановленного штока.

Шток, восстановленный методом ЭДМ, показал значительно меньшую износостойкость, чем новый и восстановленный методом ГМ с последующим модифицированием.

**Заключение.** Таким образом, разработан технологический процесс восстановления штоков силовых гидроцилиндров монтажного оборудования гиперзвуковой металлизацией с последующим трибомодифицированием, рекомендуемый при ремонте штоков диаметром 30–120 мм, эксплуатирующихся в гидроцилиндрах с номинальным рабочим давлением от 10 до 22 МПа. Износостойкость восстановленных по разработанной технологии рабочих поверхностях штоков выше, чем у новых штоков в 1,15–1,25 раза.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Оценка возможности использования гиперзвуковой металлизации при восстановлении элементов гидросистем / М.А. Белоцерковский [и др.] // Вестн. Полоц. гос. университета. Сер. В, Промышленность, Прикладные науки. – 2015. – № 11. – С. 36–42.
2. Восстановление валов нанесением комбинированных покрытий гиперзвуковой металлизацией / М.А. Белоцерковский [и др.] // Вестн. Полоц. гос. университета. Сер. В, Промышленность, Прикладные науки. – 2017. – № 11. – С. 79–83.
3. Особенности получения покрытий из псевдосплавов методом гиперзвуковой металлизации / М.А. Белоцерковский [и др.] // Вестн. Полоц. гос. университета. Сер. В, Промышленность, Прикладные науки. – 2018. – № 11. – С. 95–100.
4. Повышение износостойкости стальных покрытий, используемых для восстановления штоков / А.И. Ялович [и др.] // Перспективные материалы и технологии : сб. материалов междунар. симп., Брест, 27–31 мая 2019 г. / под. ред. В.В. Рубаника. – Витебск : ВГТУ, 2019. – С. 658–660.
5. Повышение работоспособности элементов трибосопрежений с металлическими покрытиями фрикционным модифицированием / В.И. Жорник [и др.] // Инновационные технологии в машиностроении : материалы междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 35-летию машиностроит. фак. ПГУ, Новополоцк, 19–20 окт. 2011 г. / Полоц. гос. ун-т ; под общ. ред. А.И. Гордиенко, В.К. Шелега. – Новополоцк : ПГУ, 2011. – С. 236–238.
6. Стенды для сборки/разборки и испытания гидроцилиндров. – Режим доступа: <http://hydrospecstand.ru/produktsiya/sgts>. – Дата доступа: 25.05.2017.
7. Стенд СТИГ-10. – Режим доступа: <http://dta-stend.ru/Catalogues/gidroagr/stig1.html?template=83>. – Дата доступа: 1.06.2017.
8. Стенд для проверки и регулировки гидроагрегатов КИ-28097М. – Режим доступа: <http://www.avk76.ru/catalog/detail.php?ID=3109>. – Дата доступа: 1.06.2017.
9. Кобзов, Д.Ю. Гидроцилиндры дорожных и строительных машин. / Д.Ю. Кобзов, В.А. Тарасов, А.А. Трофимов. – Деп. БрГТУ в ВИНТИ 27.01.2011 № 3552-1399. – Ч. 2 : Условия эксплуатации, рабочий процесс, режим работы и параметры нагружения. – 108 с.
10. Гидравлика : в 2 т. – М. : Академия, 2012. – Т. 2 : Гидравлические машины и приводы / В.И. Иванов [и др.]. – 288 с. – (Бакалавриат).

Поступила 18.12.2020

#### RECONDITIONING AND TESTING OF A HYDROLIC POWER CYLINDER ROD

*M. BELOTSERKOVSKIJ, A. DUDAN, A. YALOVIK*

*The technological process of reconditioning hydrolic power cylinder rods of road construction machinery with the help of hypersonic metallization followed by tribromopyridine recommended in the repair of rods with a diameter of 30–120 mm, used in hydraulic cylinders with nominal working pressure from 10 to 22 MPa. Tests have shown that the wear resistance of the working surfaces of the rods restored according to the developed technology is higher than that of the new rods by 1.15–1.25 times.*

**Keywords:** *rod reconditioning, hypersonic metallization, benchmark trials, tri-bomechanical modification, gas-thermal coatings.*

УДК 621.113

**ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ДИЗЕЛЬНЫХ ТОПЛИВНЫХ ФОРСУНОК  
С ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ БЕЗ СНЯТИЯ С ДВИГАТЕЛЯ****В.В. КОСТРИЦКИЙ, А.В. ПАВЧЕНКО**  
(Полоцкий государственный университет)

*Рассмотрен метод диагностирования дизельных топливных форсунок, который позволяет эффективно оценить их техническое состояние без снятия с двигателя. Этот метод применим в первую очередь в тех случаях, когда форсунки невозможно снять без механических повреждений. Проверка форсунок без снятия производится сравнительным анализом показателей параметров всех форсунок двигателя. К этим параметрам можно отнести коррекцию цикловой подачи топлива, калибровку нулевой подачи, характеристики управляющего сигнала, сопротивление форсунки, расход топлива на управление. Для определения состояния форсунки необходимо установить значения всех диагностических параметров. Отклонение хотя бы одного из них от номинального значения указывает на неисправность пьезофорсунки.*

**Ключевые слова:** пьезофорсунки, двигатели внутреннего сгорания, дизельные топливные системы, коррекция цикловой подачи топлива, калибровка нулевой подачи.

**Введение.** Самым совершенным устройством, обеспечивающим впрыск топлива в дизельном двигателе, является пьезоэлектрическая форсунка (пьезофорсунка). Преимуществами пьезофорсунки являются быстрота срабатывания (в 4 раза быстрее электромагнитного клапана) и, как следствие, возможность многократного впрыска топлива в течение одного цикла, а также точная дозировка впрыскиваемого топлива. Это стало возможным благодаря использованию пьезоэффекта в управлении форсункой, основанного на изменении длины пьезокристалла под действием напряжения [1]. Такая форсунка характеризуется наличием устойчивого многофазового впрыскивания топлива, минимальными порциями предварительного впрыскивания, возможностью короткого промежутка времени между предварительным и основным впрыскиванием и компактным конструктивным решением. Важно отметить, что по сравнению с электромагнитной форсункой пьезофорсунка имеет меньший расход топлива на управление и, следовательно, обладает большим КПД [1; 2].

Указанные преимущества пьезофорсунки достигнуты путем реализации в ней гидравлической схемы, которая характеризуется наличием нескольких, связанных между собой и оказывающих взаимное влияние, гидродинамических каналов, полостей и динамических звеньев. Сложность конструкции обуславливает и сложную взаимосвязь процессов, происходящих в работающей форсунке. Это приводит к тому, что такая гидродинамическая система имеет узкий диапазон значений своих структурных параметров, которые определяют как оптимальную работу форсунки, так и ее работоспособность в принципе [3; 4]. Кроме того, из-за непростой конструкции количество структурных параметров, по которым можно судить об исправности форсунки, больше 20. В связи с этим дефектовать форсунки по всем структурным параметрам трудно.

Однако изменение структурных параметров имеет общие внешние (косвенные) признаки, которые можно представить как основные диагностические параметры. Их значения можно получить при дефектовке пьезофорсунок с помощью специального дилерского оборудования. Методика такого диагностирования пьезофорсунок базируется на проверке соответствия электрических и гидравлических параметров, заданных производителем в тест-плане. К этим параметрам относятся:

- проверка герметичности форсунки;
- проверка наполнения гидрокомпенсатора;
- проверка электрических параметров пьезомодуля;
- определение минимального напряжения для активации форсунки;
- измерение количества топлива, подаваемого форсункой на различных режимах работы двигателя [5; 6].

Но установить пьезофорсунки на дорогостоящее дилерское оборудование не представляется возможным, т.к. в большинстве случаев их практически нельзя снять с двигателя без механических повреждений. К таким двигателям можно отнести те, которые устанавливаются на автомобили марок Mercedes (двигатели 2.2 CDI, 2.7 CDI, 3.0 CDI, 3.2 CDI, 4.0 CDI), Peugeot, Citroen, Ford, Volvo, Suzuki (двигатели 1.6 HDI, 1.8 HDI, 2.0 HDI, 2.2 HDI, 2.5 HDI, 2.7 HDI), Renault, Nissan, Opel (двигатели 1.9DCI, 2.0 DCI, 2.2 DCI), Hyundai, Kia (двигатели 2.0 CRDI, 2.2 CRDI, 2.5 CRDI, 2.7 2.0 CRDI), Fiat, Iveco (двигатели 2.4 JTD, 3.0 JTD) и т.д. В связи с этим разработка метода диагностирования дизельных топливных форсунок с пьезоэлектрическим приводом без снятия с двигателя является актуальной.

**Основная часть.** Для таких двигателей нами предложен метод, в котором рассматриваются в качестве оценочных характеристик такие диагностические показатели, которые возможно определить и зафиксировать без снятия форсунки с двигателя и без ее разборки. Кроме того, этот способ можно использовать для диагностирования любых дизельных двигателей с пьезофорсунками.

К диагностическим параметрам относятся:

- коррекция цикловой подачи топлива;
- калибровка нулевой подачи;
- параметры управляющего импульса;
- сопротивление форсунки;
- расход топлива на управление.

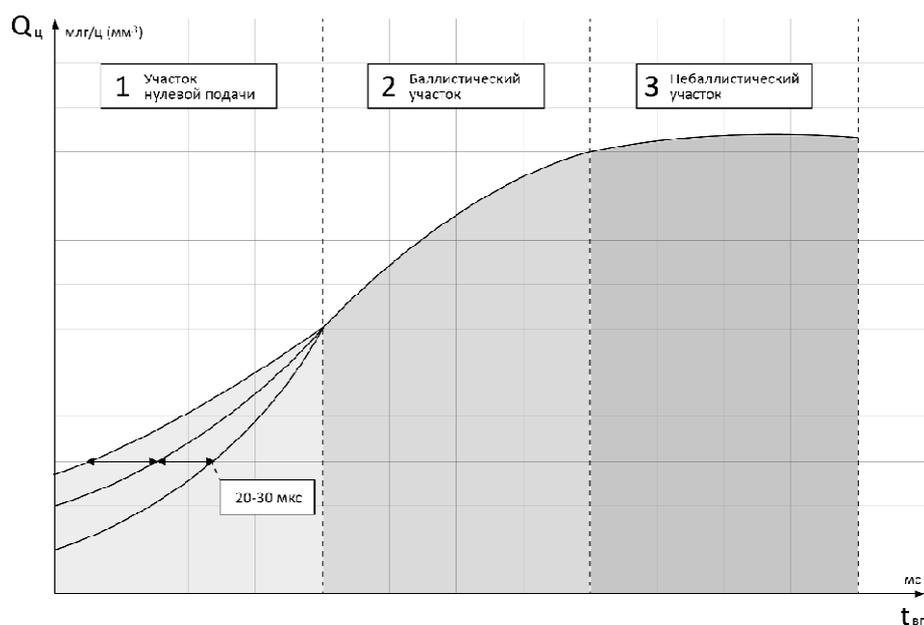
Проверка форсунок без снятия производится сравнительным анализом показателей параметров всех форсунок двигателя.

*Коррекция цикловой подачи топлива.* Цикловая подача топлива (мг) – один из важнейших показателей работы цилиндров двигателя и форсунок.

После подачи топлива в конце такта сжатия поршень в результате воспламенения этого топлива перемещается от верхней мертвой точки к нижней, передавая угловое ускорение коленчатому валу (угловое ускорение определяется с помощью датчика коленчатого вала). В идеально работающем двигателе для равномерного ускорения коленчатого вала от каждого цилиндра в одном режиме (холостой ход, частичная нагрузка двигателя, полная нагрузка двигателя и т.д.) необходимо одно и то же количество подаваемого топлива в каждый цилиндр. Однако в результате изнашивания составных частей гидросистемы пьезофорсунки часть топлива может либо сбрасываться через канал управления, либо некачественно распыляться, поэтому требуется больше топлива, чтобы получить такое же ускорение коленчатого вала. В каждый цилиндр подается разное количество топлива, и этот алгоритм работает всегда.

Разница между заложенным в электронный блок управления количеством топлива, которое необходимо подать форсункой, и реально поданным количеством называется коррекцией цикловой подачи топлива. Значение этого параметра можно оценить, подключив к автомобилю сканирующую диагностическую систему. Коррекция цикловой подачи носит относительный характер, т.е. техническое состояние по этому параметру определяется после анализа его значений на всех форсунках. Производители рекомендуют считать форсунку неисправной, если отклонение коррекции превышает 25% от номинального значения цикловой подачи.

*Калибровка нулевой подачи.* Зависимость количества подачи топлива от длительности импульса открытия пьезофорсунки можно разделить на три основных участка: участок нулевой подачи, баллистический и небаллистический участки (рисунок 1).



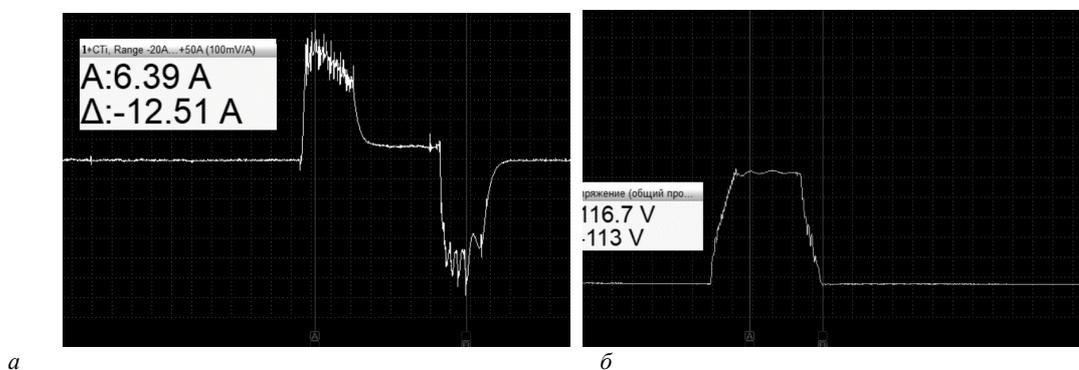
$Q_c$  – цикловая подача топлива;  $t_{en}$  – время открытия форсунки

Рисунок 1. – Зависимость количества подачи топлива от длительности импульса открытия форсунки

На баллистическом участке подача топлива растет с увеличением времени впрыска, на небаллистическом – почти не изменяется. Как правило, небаллистический участок отражает работу форсунки при повышенной нагрузке двигателя, когда дальнейшее увеличение количества топлива не приводит к нарастанию мощности, а лишь вызывает усиленное образование сажи. На этих участках каждому значению времени впрыска соответствует количество подаваемого топлива, установленное заводом-изготовителем.

Участок нулевой подачи характеризует работу форсунки при предварительных впрысках, где время открытия форсунки крайне мало, поэтому запрограммировать его невозможно. Такое время открытия форсунки составляет примерно 100 мкс, постоянно колеблется в пределах от 20 до 30 мкс и называется калибровкой нулевой подачи (мкс). Увеличение пределов колебания данного параметра свидетельствует об износе основных гидравлических элементов форсунки. Как и в случае коррекции цикловой подачи, калибровка нулевой подачи определяется при помощи сканирующей диагностической системы.

*Параметры управляющего импульса.* Для открытия клапана пьезофорсунки нужны большой ток и высокое напряжение. Управляющее напряжение пьезофорсунки находится в пределах от 70 до 120 В, поэтому для питания форсунок устанавливается отдельный, повышающий напряжение, трансформатор. При этом напряжение на форсунку подается не постоянно, а короткими импульсами (ШИМ-сигналом). При подаче и снятии напряжения происходит выброс тока, одинакового по амплитуде (порядка  $\pm 6-10$  А), но разнонаправленного по значению (рисунок 2).



*а* – осциллограмма силы тока; *б* – осциллограмма напряжения

**Рисунок 2. – Параметры управляющего сигнала**

По величине напряжения, силе тока и форме сигнала тока можно сделать вывод о состоянии форсунок. Для определения параметров управляющего импульса необходимо использовать мотортестер, подключив к одному из его каналов токовые клещи с широкой полосой пропускания, а к другому – адаптер-иглу для измерения напряжения. Токосные клещи и адаптер-иглу следует установить на провод с управляющим сигналом. Форма и значения силы тока, значения напряжения должны быть одинаковыми для всех форсунок. Любое отклонение параметров управляющего импульса указывает на неисправность форсунки.

*Сопротивление форсунки.* Пьезоэлемент форсунки должен обладать высоким омическим сопротивлением от 150 до 200 кОм. Также сопротивление между корпусом форсунки и контактами пьезоэлемента должно стремиться к бесконечности. Для определения сопротивления пьезоэлемента используют омметр, а для измерения сопротивления между пьезоэлементом и корпусом форсунки – мегомметр с возможностью подачи напряжения порядка 100 В.

*Расход топлива на управление.* Помимо этого, проверка форсунок без снятия производится сравнительным анализом объема поступающего топлива в обратную линию, т.е. измерением расхода топлива на управление (мг). Для проведения теста необходимо снять шланги со штуцеров обратного слива форсунки, установив на их место прозрачные шланги специального устройства. Это устройство представляет собой градуированные в единицах объема мерные стаканы (к каждой форсунке устанавливается отдельный мерный стакан). Расход топлива определяют на холостом ходу двигателя или при прокрутке стартером, если двигатель не заводится. Расход топлива на управление должен быть одинаковым для всех форсунок. Превышение расхода топлива на управление в два раза относительно других форсунок является критическим.

При диагностировании пьезофорсунок без снятия их с двигателя необходимо определить значения всех приведенных выше диагностических параметров. Отклонение хотя бы одного диагностического параметра от номинального указывает на неисправность форсунки. В таком случае неисправную форсунку следует заменить.

*Результаты исследований.* По данной методике было проведено диагностирование дизельных двигателей различных марок автомобилей, у которых есть проблема со снятием пьезофорсунок. В данной статье рассмотрены примеры применения метода для автомобилей Opel Vivaro с двигателем 2.0 HDI, Peugeot 607 с двигателем 2,2 HDI и Kia Sportage с двигателем 2,0 CRDI.

1. Автомобиль *Opel Vivaro с двигателем 2.0 HDI*. Этот автомобиль имеет особенности конструкции подкапотного пространства, которые позволяют дождевой воде с ветрового стекла попадать в колдцы форсунок, что приводит к коррозии и невозможности снятия форсунок без механических повреждений. В случае с этим автомобилем неисправность проявлялась как неравномерная работа двигателя на всех режимах и плохой запуск двигателя. Для определения коррекции цикловой подачи топлива и калибровки нулевой подачи использовалась сканирующая диагностическая система Launch X431 PRO; для измерения силы тока и напряжения, а также для определения формы сигнала – мотортестер USB Autoscore 4; для определения сопротивления пьезоэлемента – омметр, встроенный в мультиметр MY60, сопротивления форсунки – мегомметр Мегеон 13210. Расход топлива на управление определялся прибором Rail HCB A2252.

Результаты диагностирования этого автомобиля при помощи безразборного метода представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты диагностирования автомобиля Opel Vivaro

Номер форсунки	Параметры							
	коррекция цикловой подачи топлива, мг	калибровка нулевой подачи, мкс	сила тока, А	напряжение, В	форма сигнала	сопротивление пьезоэлемента, кОм	сопротивление форсунки, кОм	расход топлива на управление, мг
1	-1,2	8	7,7	114	без особенностей	178 кОм	–	5 мг за 2 мин
2	+0,3	15	7,7	118	без особенностей	175 кОм	–	4 мг за 2 мин
3	<b>+2,4</b>	<b>158</b>	8	114	без особенностей	168 кОм	–	<b>21 мг за 2 мин</b>
4	+0,1	12	7,9	116	без особенностей	167 кОм	–	4 мг за 2 мин

В выделенных ячейках таблицы значения параметров превышают предельно допустимые. Для данного двигателя цикловая подача топлива составляет 6,5 мг, соответственно, коррекция не должна превышать 1,95 мг топлива на цикл. Для третьей форсунки это значение значительно выше – 2,4 мг. Кроме того, для этой форсунки калибровка нулевой подачи значительно выше допустимого значения (158 мкс при предельно допустимом значении 30 мкс), расход топлива на управление в несколько раз превышает значения этого параметра для других форсунок. По полученным данным форсунку третьего цилиндра следует признать неисправной и рекомендовать ее заменить.

2. Автомобиль *Peugeot 607 с двигателем 2,2 HDI*. Главная проблема с извлечением форсунок из двигателя заключается в ограниченном моторном пространстве. Также затрудняют снятие форсунок две крепежные шпильки. Этот автомобиль имел признаки неисправности, которые характеризовались как потеря мощности, нестабильная работа двигателя под нагрузкой, повышенные показатели дымности на всех режимах работы двигателя. Причиной таких признаков неисправности могут быть неисправные форсунки. Поэтому проводилась проверка форсунок по предложенным методикам. Для определения параметров (силы тока, напряжения, сопротивления пьезоэлемента, сопротивления форсунки и расхода топлива на управление) использовалось такое же оборудование, как и для автомобиля Opel Vivaro. Для определения коррекции цикловой подачи топлива и калибровки нулевой подачи использовалась сканирующая диагностическая система Lexia 3 (XS Evolution). Результаты диагностирования представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Результаты диагностирования автомобиля Peugeot 607

Номер форсунки	Параметры							
	коррекция цикловой подачи топлива, мг	калибровка нулевой подачи, мкс	сила тока, А	напряжение, В	форма сигнала	сопротивление пьезоэлемента, кОм	сопротивление форсунки, кОм	расход топлива на управление, мг
1	+0,9	22	6,4	110	без особенностей	198 кОм	–	5 мг за 2 мин
2	+0,7	<b>77</b>	6,5	111	без особенностей	197 кОм	<b>34 Ом</b>	<b>18 мг за 2 мин</b>
3	-0,4	21	6,4	110	без особенностей	198 кОм	–	13 мг за 2 мин
4	+0,1	<b>98</b>	6,7	110	без особенностей	199 кОм	<b>29 Ом</b>	<b>19 мг за 2 мин</b>

В этом двигателе неисправны две форсунки: форсунка 2-го и 4-го цилиндров. Если такие параметры, как калибровка нулевой подачи и расход топлива на управление, незначительно превышают предельно допустимые значения (см. соответствующие ячейки таблицы 2), то сопротивление форсунок, проверенное с помощью мегомметра при подаче напряжения около 100 В, не стремится к бесконечности, а имеет очень низкие значения (для 2-й форсунки 34 Ом, для 4-й – 29 Ом). Эти форсунки стали причиной описанных признаков неправильной работы двигателя. Следовательно, их необходимо заменить.

3. Автомобиль *Kia Sportage с двигателем 2,0 CRDI*. Трудности демонтажа форсунок с этого двигателя возникают из-за формы и хрупкости корпуса. Кроме того, ограниченное пространство моторного отсека затрудняет снятие форсунок инерционным молотком.

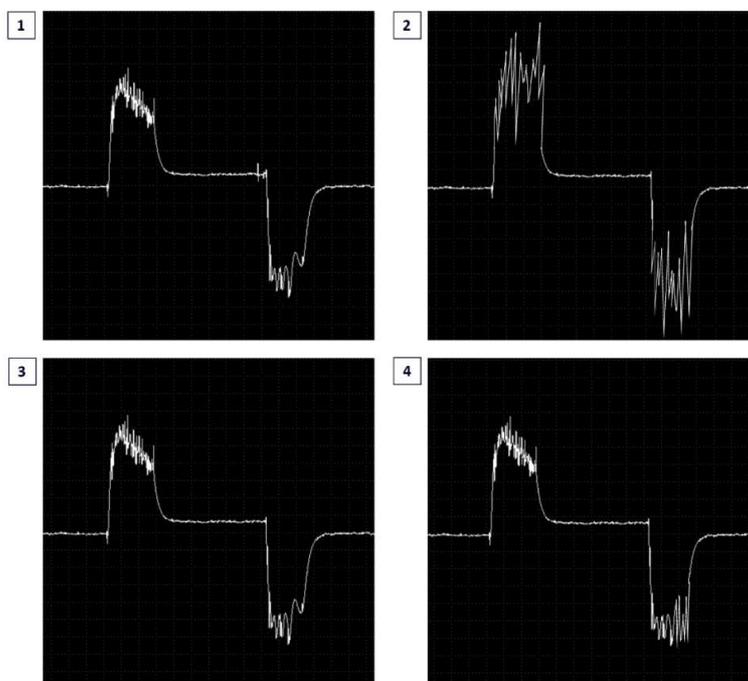
Неисправность в этом автомобиле проявлялась в виде неравномерной работы двигателя на всех режимах работы. Для определения параметров, кроме коррекции цикловой подачи и калибровки нулевой подачи пьезофорсунок, использовался такой же комплект оборудования, как и в случаях, описанных выше. Коррекцию цикловой подачи топлива и калибровку нулевой подачи определяли при помощи сканирующей диагностической системы GDS VCI Hyundai & Kia.

Значения полученных параметров после диагностирования форсунок представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Результаты диагностирования автомобиля *Kia Sportage*

Номер форсунки	Параметры							
	коррекция цикловой подачи топлива, мг	калибровка нулевой подачи, мкс	сила тока, А	напряжение, В	форма сигнала	сопротивление пьезоэлемента, кОм	сопротивление форсунки, кОм	расход топлива на управление, мг
1	-1,0	13	6,8	116	без особенностей	198 кОм	–	8 мг за 2 мин
2	-0,5	18	<b>12,1</b>	116	<b>особенности формы</b>	197 кОм	–	11 мг за 2 мин
3	+0,1	12	6,7	116	без особенностей	198 кОм	–	8 мг за 2 мин
4	-0,2	16	7,2	116	без особенностей	199 кОм	–	8 мг за 2 мин

Согласно полученным значениям параметров, форсунка 2-го цилиндра имеет более высокую силу тока (12,1 А) и особенности частоты колебания тока по сравнению с другими форсунками (рисунок 3).



1 – 1-я форсунка; 2 – 2-я форсунка; 3 – 3-я форсунка; 4 – 4-я форсунка

Рисунок 3. – Осциллограммы силы тока

Осциллограмма силы тока 2-й форсунки однозначно указывает на ее неисправность, т.к. значение силы тока и частота колебаний форсунок, установленных на один двигатель, должны быть одинаковыми. При этом остальные параметры всех форсунок не превышают предельно допустимые значения.

Во всех случаях после замены неисправных форсунок работоспособность системы питания двигателей была восстановлена.

**Заключение.** В результате исследований было установлено, что предложенный нами метод диагностирования дизельных топливных форсунок с пьезоэлектрическим приводом без снятия с двигателя позволяет эффективно определять их техническое состояние. Проверка форсунок при помощи данного метода производится сравнительным анализом показателей параметров всех форсунок двигателя.

Метод в первую очередь используется в тех случаях, когда форсунки невозможно снять с двигателя без механических повреждений. Он может использоваться и для дизельных двигателей с пьезофорсунками, не имеющими проблемы снятия, т.к. не требует дорогостоящего дилерского оборудования.

Для дизельных двигателей таких марок машин, как Mercedes, Peugeot, Citroen, Ford, Volvo, Suzuki, Renault, Nissan, Opel, Hyundai, Kia, Fiat и Iveco, этот метод является единственно возможным способом оценки технического состояния пьезофорсунок.

Преимущество метода заключается в использовании недорогого оборудования. Кроме того, данный метод требует небольших временных затрат и обладает достаточно высокой точностью полученных результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Диагностика и техническое обслуживание машин : учеб. / А.Д. Ананьин [и др.]. – М : Академия, 2015. – 416 с.
2. Неговора, А.В. Улучшение эксплуатационных показателей автотракторных дизелей совершенствованием конструкции и технологии диагностирования топливоподающей системы : дис. ... д-ра техн. наук : 05.04.02 / А.В. Неговора. – СПб., 2004. – 343 л.
3. Грехов, Л.В. Аккумуляторная топливная система с электро-гидроуправляемой форсункой / Л.В. Грехов, И.И. Габитов, А.В. Неговора // Тракторы и сельхозмашины. – 2001. – № 7. – С. 14–16.
4. Неговора, А.В. Диагностирование топливной аппаратуры автотракторных дизелей / А.В. Неговора., Л.В. Грехов, И.И. Габитов // Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения : сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. 100-лет Вибс. – Челябинск : ЮУрГУ, 2003. – 85 с.
5. Гюнтер, Г. Диагностика дизельных двигателей : [пер. с нем.] / Г. Гюнтер. – М. : За рулем, 2004. – 176 с. – (Автомеханик).
6. Скляр, В. Ремонт и обслуживание форсунок дизельных двигателей: практическое руководство / В. Скляр, С. Яковенко, А. Скляр. – Ростов на/Д : ПОНЧиК, 2000. – 24 с.

Поступила 12.11.2020

### DIAGNOSING DIESEL FUEL INJECTORS WITH PIEZOELECTRIC DRIVE WITHOUT REMOVING FROM THE ENGINE

V. KOSTRITSKY, A. PAVCHENKO

*A method for diagnosing diesel fuel injectors is considered, which makes it possible to effectively assess their technical condition without removing them from the engine. This method is applicable primarily in cases where the injectors cannot be removed without mechanical damage. Checking the injectors without removing is carried out by a comparative analysis of the parameters of all engine injectors. These parameters include the correction of the cyclic fuel supply, calibration of zero supply, characteristics of the control signal, injector resistance, fuel consumption for control. To determine the condition of the injector, it is necessary to set the values of all diagnostic parameters. Deviation of at least one diagnostic parameter from the nominal value indicates a malfunction of the piezo injector.*

**Keywords:** piezo injectors, internal combustion engines, diesel fuel systems, fuel cycle correction, zero flow calibration.

## ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 658.345:631.8

### УЛУЧШЕНИЕ УСЛОВИЙ И ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА ПРИ МЕХАНИЗИРОВАННОМ КОНТАКТНОМ ВНЕСЕНИИ ПЕСТИЦИДОВ НА РАСТЕНИЯ

**В.Л. МИСУН***(Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск)*

*Усовершенствована конструкция и улучшены условия труда при эксплуатации технического средства для контактного внесения пестицидов на растения. Разработана математическая модель, устанавливающая зависимость показателя превышения допустимого уровня подачи пестицида на контактируемый с растениями валец технического средства от его режимов работы.*

**Ключевые слова:** *безопасность, условия труда, техническое средство, пестициды, растительность.*

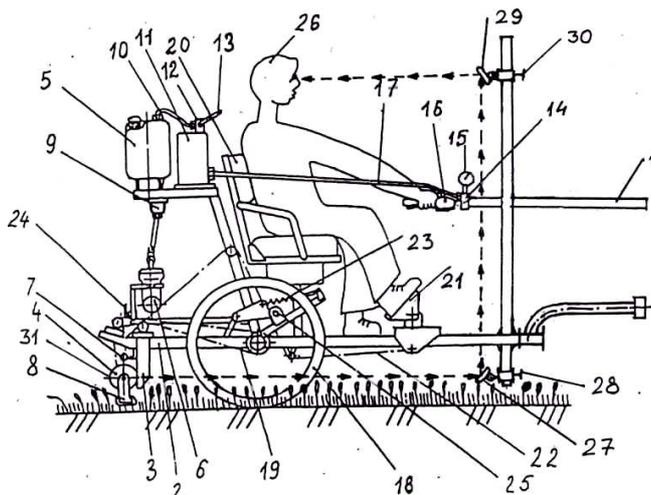
**Введение.** Анализ состояния проблемы производственной безопасности процесса внесения пестицидов в сельскохозяйственном производстве показал, что в связи с сокращением пахотных земель и ростом численности населения объем использования пестицидов в мире будет возрастать. Применение средств защиты растений (пестицидов) от сорняков, болезней и вредителей, например, при промышленном выращивании плодов и ягод, является одним из факторов интенсификации и важным резервом увеличения производства плодовойгодной продукции, поэтому вопросы уменьшения вредного воздействия на производственную среду токсичных компонентов, используемых для защиты растений промышленных плантаций, остаются актуальными. К тому же обработка растений пестицидами сопровождается выделением в воздух рабочей зоны химических веществ, создаются концентрации, опасные для работников. Так, по данным Всемирной организации здравоохранения и Международной организации труда, пестициды становятся причиной более 10% всех производственных травм в сельском хозяйстве. Опрыскивание, опыливание растений пестицидами являются по существу генераторами загрязнения производственной среды. О неуправляемости процесса попадания, например, капель распыливаемой жидкости на растения, свидетельствуют результаты применения авиации, генераторов аэрозоля, вентиляторных и штанговых опрыскивателей, которые характеризуются стеканием крупных капель размером более 350 мкм с листовой поверхности на землю или сносом капель размером менее 80 мкм за пределы поля [1]. А если принять во внимание, что промышленные плодовойгодные плантации во многих случаях практически примыкают к населенным пунктам, то такие методы использования агрохимикатов неприемлемы.

**Основная часть.** В современных условиях может быть востребованой только та техника, которая при условиях производственной безопасности и экологической чистоты обеспечивает максимальный экономический эффект. Чем меньше техника загрязняет окружающую среду и при ее эксплуатации соблюдаются необходимые условия труда, чем дороже обходятся изготовителю специальные компоненты. Тем не менее, считаем важным напомнить о приоритете безопасности персонала и защиты окружающей среды в вопросах экономической выгоды.

Для повышения качества, эффективности и безопасности механизированного внесения раствора пестицида на растения нами усовершенствовано техническое средство [2; 3] (рисунок 1), агрегируемое с мотоблоком, содержащее установленные на раме бачок для рабочего раствора, валец с возможностью его вращательного движения, на поверхности которого закреплен ворсистый канат, кран системы подачи раствора пестицида к вальцу, включающей поплавковую камеру и распределительную полиэтиленовую трубу, опорные колеса, сидение, педаль установки высоты вальца, систему уравнивания усилия педали, а также лоток для сбора капель пестицида. Между бачком для рабочего раствора и поплавковой камерой установлен фильтр. При этом верхняя часть бачка соединена воздухопроводом с краном системы подачи сжатого воздуха, состоящей из соединенного с воздухопроводом ресивера и распределительной коробки с присоединенными к ней манометром и воздухонагнетательной грушей с перепускным клапаном одностороннего действия. Вся контактная поверхность вальца выполнена в виде сетки из хлопчатобумажных нитей. Для управления подъемом или опусканием вальца относительно обрабатываемой растительности установлена система зеркал.

Во время движения опорные колеса технического средства с помощью цепной передачи приводят во вращение валец, который, касаясь своей внешней поверхностью расположенные выше растений сорняки, подвергает их воздействию пестицидом. Внешняя поверхность вальца, выполненная в виде сетки, способствует минимизации скатывания капель раствора вниз, повышая качество и производительность выполнения

технологического процесса. Сорняки на различных участках поля произрастают неравномерно как по густоте, так и по высоте, поэтому оператор мобильной сельскохозяйственной техники (МСХТ), наблюдая за текущим положением вальца относительно верхней части сорняков, оперативно корректирует положение вальца относительно поверхности поля с помощью педали, воздействуя пропитывающим его гербицидом на верхушки сорняков, не задевая при этом культурные растения. Одновременно он, по необходимости, дополнительно нагнетает воздух до требуемого уровня сжатия согласно показаниям манометра. Во время холостого хода или стоянки ручка переключения переводится в положение для прекращения поступления раствора гербицида к вальцу, капли пестицида, не впитавшиеся в покрытую хлопчатобумажной сеткой ворсистую поверхность вальца, собираются лотком. Управляя движением агрегата, оператор МСХТ одновременно контролирует с помощью системы зеркал положение вальца относительно сорной растительности на различных участках поля.



1 – моторблок; 2 – рама; 3 – кронштейн; 4 – валец; 5 – бачок; 6 – поплавковая камера; 7 – распределительная полиэтиленовая труба с отверстиями; 8 – лоток для сбора капель пестицида; 9 – фильтр; 10 – воздухопровод; 11 – ресивер; 12 – кран системы подачи сжатого воздуха; 13 – ручка переключения; 14 – распределительная коробка; 15 – манометр; 16 – воздухомангнетательная груша; 17 – воздухопровод; 18 – опорные колеса; 19 – цепная передача; 20 – сидение; 21 – педаль; 22 – цепь; 23 – система уравновешивания педали; 24 – кран системы подачи раствора пестицида к вальцу; 25 – палец; 26 – оператор МСХТ; 27 – нижнее зеркало; 28 – винт; 29 – верхнее зеркало; 30 – винт; 31 – сетка из хлопчатобумажных нитей

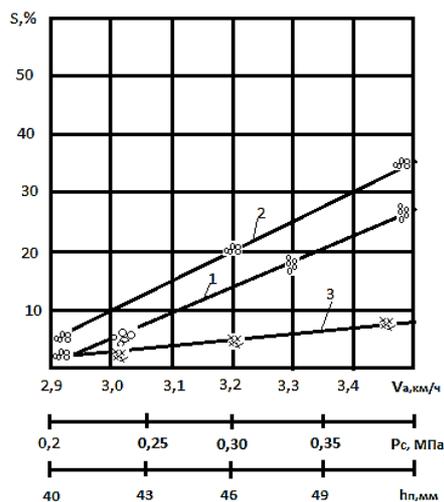
Рисунок 1. – Техническое средство для безопасного контактного внесения раствора пестицида на растения

К работе с рассматриваемым техническим средством допускаются лица, имеющие соответствующую квалификацию, изучившие санитарные правила по хранению, транспортировке и применению пестицидов (ядохимикатов) и прошедшие соответствующий инструктаж по технике безопасности. Обслуживающий такую технику персонал должен быть обеспечен средствами для защиты органов дыхания и зрения.

Для защиты органов дыхания предлагается противоаэрозольный респиратор, на конструкцию которого получен патент [4], содержащий полумаску из сорбционно-фильтрующего материала с обтюратором, регулятором и оголовьем, которое присоединено с двух сторон с помощью эластичного шнура к полумаске. Обтюратор в верхней его части имеет эластичное сеточное полотно, позволяющее охватить поверхности головы и ушей работника, что практически устраняет попадание вредных веществ в виде аэрозолей внутрь.

Для защиты органов зрения при обращении с пестицидами предлагается патентное решение конструкции респиратора [5], включающее фильтрующе-поглощающую систему из пакета эластичных фильтрующего и сорбирующего материалов. Корпус фильтрующей маски соединен с очками, а также резиновым обтюратором и подмасочником. Изоляция подмасочного пространства от окружающей среды в лобной и подбородочной частях обеспечивается конструктивными элементами (двумя симметричными складками) и специальной конструкцией очков с пружинными наружными зажимами и возможностью установки на их наружной поверхности линз различных диоптрий в соответствии со степенью пониженности функции зрения работника. Служащий для разделения зоны видимости и дыхания и обеспечивающий незапотеваемость очков резиновый подмасочник предотвращает как увлажнение фильтрующего и сорбирующего материала выдыхаемым воздухом, так и накопление диоксида углерода. Для индивидуального подбора респиратора проводится его инструментальная проверка.

Для обеспечения безопасной эксплуатации разработанного технического средства была поставлена задача обосновать требуемые для этого режимы его работы. Согласно результатам проведенных экспериментальных исследований в качестве критерия для оценки безопасности контактного внесения раствора пестицида на растения использован показатель превышения допустимого уровня подачи жидкости на валец ( $S_{ж}$ ), а наиболее существенными факторами, влияющими на выполнение этого технологического процесса, являются: скорость движения технического средства ( $v_a$ ), давление в трубопроводе нагнетательной системы подачи жидкости на валец ( $P_c$ ) и высота ее подачи из отверстий трубопровода на валец ( $h_n$ ) (рисунок 2).



- 1 – от скорости движения технического средства  $v_a$  ( $P_c = 0,2$  МПа;  $h_n = 50$  мм) ;
- 2 – давления в трубопроводе нагнетательной системы подачи жидкости на валец  $P_c$  ( $v_a = 3$  км/ч;  $h_n = 50$  мм) ;
- 3 – высоты подачи жидкости на валец  $h_n$  ( $v_a = 3$  км/ч;  $P_c = 0,2$  МПа)

Рисунок 2. – Зависимость показателя превышения допустимого уровня подачи жидкости ( $S_{ж}$ ) на валец технического средства для контактного внесения раствора пестицида на растения

Анализ результатов предварительных исследований показал, что для описания рассматриваемого процесса целесообразно использовать уравнение регрессии следующего вида:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_{12} \cdot x_{12} + a_{13} \cdot x_{13} + a_{23} \cdot x_{23}, \quad (1)$$

где  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_{12}, a_{13}, a_{23}$  – коэффициенты уравнения регрессии.

В опытах реализован полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа  $2^3$  (таблица 1). Уровни, кодовые значения и интервалы варьирования факторов приведены в таблице 2.

Таблица 1. – Матрица планирования эксперимента. Результаты эксперимента

№ опыта	Планирование эксперимента			Опытные данные			Результаты эксперимента			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$\bar{Y}_j$	$S_j^2$	$Y^p$	$(\bar{Y}_j - Y^p)^2$
1	-1	-1	-1	2,84	2,80	2,84	2,83	0,0025	2,76	0,0049
2	1	-1	-1	14,05	14,02	14,06	14,04	0,0025	13,90	0,0196
3	1	1	-1	24,26	24,24	24,20	24,23	0,0049	24,06	0,0289
4	1	1	1	25,88	25,85	25,82	25,85	0,0036	25,72	0,0169
5	-1	1	1	14,63	14,64	14,61	14,63	0,0009	14,58	0,0025
6	-1	-1	1	4,46	4,44	4,43	4,44	0,0009	4,40	0,0016
7	-1	1	-1	12,46	12,40	12,42	12,43	0,0049	12,34	0,0081
8	1	-1	1	3,26	16,22	16,26	16,25	0,0025	16,12	0,0169
							$\sum \bar{Y}_j = 114,70$	$\sum_{j=1}^N S_j^2 = 0,0227$	$\phi = \sum (\bar{Y}_j - Y^p) = 0,0994$	

Таблица 2. – Уровни и интервалы варьирования факторов

Обозначение факторов	$x_1$	$x_2$	$x_3$
Варьируемый фактор	$V_a$	$P_c$	$h_n$
Единица измерения	км/ч	МПа	мм
Основной уровень ( $x = 0$ )	3,2	0,3	47
Интервал варьирования	0,1	0,1	2,5
Нижний уровень ( $x = -1$ )	2,9	0,2	42
Верхний уровень ( $x = 1$ )	3,5	0,4	52
Формулы для перевода натуральных значений факторов в нормированные и обратно	$x_1 = \frac{V_a - 3,2}{0,1}$ , $V_a = 0,1 \cdot x_1 + 3,2$	$x_2 = \frac{P_c - 0,3}{0,1}$ , $P_c = 0,1 \cdot x_2 + 0,3$	$x_3 = \frac{h_n - 47}{2,5}$ , $h_n = 2,5 \cdot x_3 + 47$

В результате статистической обработки опытных данных установлено:

а) все восемь выборочных дисперсий ( $S^2$ ) однородны по критерию Кохрена:

$$G_s < G_{n-1;N;p},$$

где  $G_s$  – экспериментальное значение критерия Кохрена,

$$G_s = \frac{\max S_j^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2} = \frac{0,0049}{0,0227} = 0,216;$$

$G_{n-1;N;p}$  – критическое значение критерия Кохрена при числе степеней свободы  $f_{числ.} = n - 1$ ,  $f_{знам.} = N$  и доверительной вероятности  $p = 0,95$  [6],

$$G_{n-1;N;p} = G_{2;8;0,95} = 0,516;$$

б) с учетом того, что все выборочные дисперсии однородны, дисперсия воспроизводимости и число ее степеней свободы ( $f$ ) рассчитываются по следующим формулам:

$$S_{воспр.}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N S_j^2}{N} = \frac{0,0227}{8} = 0,0028;$$

$$f = N \cdot (n - 1) = 8 \cdot (3 - 1) = 16;$$

в) коэффициенты уравнения регрессии (1) рассчитаны [7] как

$$a_0 = \frac{\sum_{j=1}^N \bar{Y}_j}{N}, \quad (2)$$

$$a_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} \cdot \bar{Y}_j}{N}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N, \quad (3)$$

$$a_{is} = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} \cdot x_{sj} \cdot \bar{Y}_j}{N}, \quad i, s = 1, 2, 3, \dots, N \quad (4)$$

и равны

$$a_0 = 14,337; \quad a_1 = 5,755; \quad a_2 = 4,948; \quad a_3 = 0,955; \quad a_{12} = 0,015; \quad a_{13} = 0,020; \quad a_{23} = 0,011;$$

г) доверительный интервал ( $\Delta a$ ) для всех коэффициентов уравнения регрессии равен

$$\Delta a = t_{N(n-1);p} \cdot \sqrt{\frac{S_{воспр.}^2}{n \cdot N}},$$

где  $t_{N(n-1);p}$  – табличное значение критерия Стьюдента при числе степеней свободы и доверительной вероятности  $p = 0,95$  ( $t_{мабл.} = t_{N(n-1);p} = t_{16;0,95} = 1,746$ ) [8],

$$\Delta a = 1,746 \cdot \sqrt{\frac{0,0028}{3 \cdot 8}} = 0,019.$$

Из рассчитанных значений коэффициентов уравнения регрессии значимы пять коэффициентов –  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_{13}$ , т.к.

$$\Delta a < |a_i|, (i = 0; 1; 2; 3) \text{ и } \Delta a < |a_{is}|, (i, S = 0; 1; 2; 3; i < S);$$

д) полученное уравнение регрессии адекватно, т.к.  $F_9 < F_{табл.}$ ,

где  $S_{a0}^2 = \frac{n \cdot \Phi}{f_{a0}}$ ,  $f_{a0} = N - B$ ,  $B$  – число значимых коэффициентов уравнения регрессии.

Тогда

$$S_{a0}^2 = \frac{3 \cdot 0,0994}{8 - 5} = 0,103;$$

$$F_9 = \frac{S_{воспр.}^2}{S_{a0}^2} = \frac{0,0028}{0,103} = 0,272;$$

$$F_{табл. [8]} = F_{N(n-1); N-B; p} = F_{16; 3; 0,95} = 3,24.$$

Таким образом, уравнение (1) в нормированных значениях факторов имеет следующий вид:

$$Y = 3,337 + 5,755 \cdot x_1 + 4,948 \cdot x_2 + 0,955 \cdot x_3 + 0,020 \cdot x_1 \cdot x_3. \quad (5)$$

Для получения функции отклика в зависимости от натуральных значений факторов декодируем уравнение (5), используя данные таблицы 2:

$$Y = -179,231 + 53,79 \cdot V_a + 49,48 \cdot P_c + 0,126 \cdot h_n + 0,08 \cdot V_a \cdot h_n. \quad (6)$$

Анализ выражения (5) показывает:

а) наилучший результат, минимальное значение показателя превышения допустимого уровня подачи раствора пестицида ( $S_{ж.}$ ) на валец технического средства для контактной обработки растений, достигается при  $x_1 = -1, x_2 = -1, x_3 = -1$  и равен  $S_{ж. \min} = 1,7\%$ ;

б) скорость движения технического средства ( $x_1$ ) имеет более существенное влияние на безопасность контактного внесения раствора пестицида на растения, чем другие рассматриваемые факторы  $x_2$  и  $x_3$ . Об этом свидетельствуют значения регрессионных коэффициентов в полученном уравнении (5):

$$x_1 = 5,755 > x_2 = 4,948 > x_3 = 0,955.$$

**Закключение.** Анализ полученной математической модели (6), рекомендуемой для оценки безопасности механизированного контактного внесения раствора пестицида на растения (для борьбы с болезнями, сорняками, вредителями), показал, что наиболее рациональными режимами работы технического средства являются следующие: скорость движения 2,9 км/ч, давление в трубопроводе нагнетательной системы и высота подачи раствора пестицида на валец соответственно 0,2 МПа и 42 мм. Соблюдение этих режимов работы технического средства способствует минимальным потерям агрохимиката, оцениваемым в 1,69% от допустимого регламентируемого уровня.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Киреев, И.М. Научные основы совершенствования технологий протравливания, посева семян и опрыскивания растений / И.М. Киреев. – М. : Росинформатех, 2011. – 370 с.
2. Устройство для контактного внесения гербицидов, агрегатируемое с мотоблоком : пат. ВУ 12722 / Л.В. Мисун, В.Л. Мисун, В.А. Агейчик. – Оpubл. 30.12.2008.
3. Устройство для контактного внесения гербицидов, агрегатируемое с мотоблоком : пат. ВУ 11648 / Л.В. Мисун, А.Л. Мисун, В.А. Агейчик, В.В. Азаренко, В.Л. Мисун, И.Н. Мисун. – Оpubл. 30.04.2018.
4. Респиратор для защиты органов дыхания оператора мобильной сельскохозяйственной техники : пат. ВУ 12071 / А.Л. Мисун, О.Г. Агейчик, Л.В. Мисун, В.А. Агейчик, В.В. Азаренко, В.Л. Мисун, И.Н. Мисун, В.А. Иванушкина, И.М. Морозова. – Оpubл. 30.08.2019.
5. Респиратор для защиты органов дыхания и зрения работников агропромышленного комплекса от воздействия вредных веществ : пат. ВУ 12362 / А.Л. Мисун, О.Г. Агейчик, Л.В. Мисун, А.Г. Кузнецов, В.А. Агейчик, В.В. Азаренко, В.Л. Мисун, А.В. Гаркуша, В.А. Иванушкина. – Оpubл. 30.08.2020.

6. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М. : Наука, 1969. – 576 с.
7. Леонов, А.Н. Основы научных исследований и моделирования / А.Н. Леонов, М.М. Дечко, В.Б. Ловкис. – Минск : БГАТУ, 2010. – 276 с.
8. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: методы обработки / Н. Джонсон, Ф. Лион. – М. : Мир, 1980. – 610 с.

Поступила 04.12.2020

**IMPROVEMENT OF WORKING CONDITIONS AND SAFETY  
DURING MECHANIZED CONTACT APPLICATION OF PESTICIDES TO PLANTS**

**V. MISUN**

*The design has been improved and working conditions have been improved during the operation of technical equipment for contact application of pesticides to plants. A mathematical model has been developed that establishes the dependence of the indicator of exceeding the permissible level of pesticide supply to the roll of technical equipment in contact with plants on its operating modes.*

**Keywords:** *safety, working conditions, technical means, pesticides, vegetation.*

## ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 614.8.084:331.45

### ВЫБОР ЭКСПЕРТНОЙ ГРУППЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РИСКА

**В.Н. САМУСЕВИЧ**

*(Управление промышленной безопасности и энергосбережения концерна «Белнефтехим», Минск),  
канд. техн. наук, доц. Ю.А. БУЛАВКА  
(Полоцкий государственный университет)*

*Предложен метод определения количественного и квалификационного состава экспертной группы для реализации процедуры идентификации опасностей и оценки профессиональных рисков для работников. Определены профессиональные личностные качества членов экспертной группы и методы их диагностирования. Цифровизация предлагаемой методики позволяет оперативно и эффективно определить количественный и квалификационный состав экспертной группы, сформировать перечень потенциальных кандидатов в ее состав, а также разноуровневую базу потенциальных экспертов для последующего анализа эффективности их работы при реализации процедуры идентификации опасностей и оценки профессионального риска. Привлечение в рабочую группу наиболее компетентных экспертов приведет к повышению достоверности экспертных оценок и снизит неопределенность оценки уровня профессионального риска.*

**Ключевые слова:** охрана труда, профессиональный риск, экспертная группа, идентификация опасностей.

**Введение.** Среди многих направлений деятельности предприятий особое значение имеет деятельность по контролю и управлению охраной труда и промышленной безопасностью.

Общепризнанной во всем мире мерой негативного воздействия условий труда на здоровье работников является уровень профессионального риска [1–9]. На законодательном уровне закреплена необходимость проведения идентификации опасностей, оценки профессиональных рисков и их управлением и в Республике Беларусь, а именно: введенным в действие с 1 мая 2020 г. СТБ ISO 45001-2020 «Системы менеджмента здоровья и безопасности при профессиональной деятельности. Требования и руководство по применению», утвержденным постановлением Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь от 25.02.2020 № 8; рекомендациями по разработке системы управления охраной труда в организации, утвержденными приказом Министерства труда и социальной защиты Республики Беларусь от 30.12.2019 № 108. Статья 17 Закона Республики Беларусь «Об охране труда» от 23.06.2008 № 356-З обязывает нанимателей обеспечивать идентификацию опасностей, оценку профессиональных рисков, определять меры управления профессиональными рисками и анализ их результативности.

Оценка профессионального риска невозможна без проведения первоначальной процедуры подбора экспертной группы, которая будет осуществлять определение вероятных опасных событий и возможную тяжесть последствий их реализации [2]. Полнота выявления существующих опасностей, достоверность их характеристик является базисом дальнейшего эффективного управления профессиональными рисками и снижения негативного воздействия вредных и опасных производственных факторов на работников.

Для проведения процедуры идентификации опасностей, оценки профессиональных рисков и разработки мер по управлению ими на предприятиях формируется экспертная группа из работников организации, имеющих соответствующий стаж работы и компетенцию.

Оптимальный результат экспертной оценки достигается при наличии вероятно-достаточного количества экспертов в экспертной группе, обладающих соответствующей квалификацией и личностными характеристиками. Рядом авторов указанная величина определяется как «не более 10 экспертов» [10; 11].

Данное число экспертов в составе группы подтверждается результатами проведенного сравнительного анализа методик идентификации опасностей и оценки риска, применяемых организациями химической и нефтехимической отрасли Республики Беларусь [6; 12]. Согласно анализу, приведенному в [12], наиболее объективные исходные данные о существующих опасностях и вероятностях их негативного воздействия на персонал достигаются в экспертных группах с количеством экспертов не менее 5 и привлечением работника, занятого на соответствующем рабочем месте.

**Результаты и их обсуждение.** Принимая во внимание, что квалификации и мнения экспертов в экспертной группе относительно идентифицируемых опасностей и их ранга могут существенно различаться, предлагается численность и состав группы определять по следующему алгоритму.

1. *Формирование потенциальной экспертной группы и определение компетентности каждого из потенциальных кандидатов.*

Формирование потенциальной экспертной группы предлагается осуществлять методом простой случайной выборки 10 потенциальных кандидатов из общего списочного количества инженерно-технических работников организации, имеющих соответствующую квалификацию и соответствующих следующим критериям:

- наличие ученой степени;
- инженер со стажем более 20 лет;
- инженер со стажем 15–20 лет;
- инженер со стажем 10–15 лет;
- инженер со стажем 5–10 лет;
- инженер со стажем менее 5 лет.

При этом максимальный количественный состав потенциальной экспертной группы составит не более 60 человек.

2. *Определение квалификации потенциальных экспертов.*

Определение квалификации потенциального эксперта из ранее отобранной группы предлагается определять путем расчета коэффициента компетентности  $EQ$  по формуле

$$EQ = Q_1 + Q_2,$$

где  $Q_1$  – коэффициент, отражающий уровень профессиональной подготовки, информированности и базовой аргументации  $i$ -го эксперта;

$Q_2$  – коэффициент, отражающий личные качества  $i$ -го эксперта.

Коэффициент, отражающий уровень профессиональной подготовки, информированности и базовой аргументации  $i$ -го эксперта ( $Q_1$ ), определяется как сумма баллов по таблице 1.

Таблица 1. – Уровень профессиональной подготовки, информированности и базовой аргументации эксперта

№ п/п	Критерий	Высокая	Средняя	Низкая
1	<b>Теоретические знания:</b>			
1.1	наличие ученой степени:			
1.1.1	по специализации	1		
1.1.2	по смежным специализациям		0,5	
1.1.3	по непрофильным специализациям			0,2
1.2	наличие опубликованных научных статей, монографий и т.д.:			
1.2.1	по специализации	1		
1.2.2	по смежным специализациям		0,5	
1.2.3	по непрофильным специализациям			0,2
1.3	знание наилучших доступных технологий (самооценка)	1	0,5	0,2
1.4	реализованные рационализаторские или аналогичные предложения	1	0,5	0,2
1.5	наличие дополнительного обучения по специализации	1	0,5	0,2
1.6	оценка теоретических знаний непосредственным руководителем	1	0,5	0,2
1.7	самооценка теоретических знаний	1	0,5	0,2
2	<b>Производственный опыт:</b>			
2.1	стаж более 20 лет	1		
2.2	стаж 15–20 лет		0,8	
2.3	стаж 10–15 лет		0,6	
2.4	стаж 5–10 лет		0,4	
2.5	стаж менее 5 лет			0,2
3	<b>Личное знакомство с передовым зарубежным опытом:</b>			
3.1	наличие профильных зарубежных командировок и их результативность (вклад, инициирование внедрения нового или его внедрение и т.п.)	1 (внедрение нового, сокращение издержек и т.п.)	0,5 (инициирование внедрения нового и т.п.)	0,2 (без вклада)
3.2	посещение специализированных выставок и форумов	1 (очень часто)	0,5 (периодически)	0,2 (редко)

Коэффициент, отражающий личные качества потенциального эксперта ( $Q_2$ ), определяется по формуле

$$Q_2 = \frac{Q_{2i}}{N},$$

где  $Q_{2i}$  – сумма баллов  $Q$ , набранных потенциальным экспертом по итогам тестирования, определяемая по таблице 2;

$N$  – количество диагностических методов, по которым потенциальный эксперт получил баллы  $Q$ , равные 0,2 (в случае если количество таких оценок равно 0, то  $N$  не учитывается; если равно 1, то  $N = 2$ ).

Таблица 2. – Диагностические методы и баллы  $Q$ , набранные потенциальным экспертом по итогам тестирования

Профессиональные важные качества	Свойства	Диагностические методики [10; 12–22]	Критерий/баллы	Высокая	Средняя	Низкая	
1	2	3	4	5	6	7	
Внимание	Концентрация	Корректирующая проба с буквами	ошибок за 60 с	3 и менее	4–6	Более 5	
			баллы $Q$	1	0,5	0,2	
	Объем, устойчивость	Корректирующая проба с буквами	темп выполнения	0–4	5–6	Более 7	
			баллы $Q$	1	0,5	0,2	
	Распределение, переключаемость	Черно-красная таблица (ЧКТ)	баллы теста	15–20	14–10	0–9	
			баллы $Q$	1	0,5	0,2	
Мыслительные	Аналитическое мышление и вычислительные способности	Методика исследования особенностей мышления (МИОМ 1–6)	баллы теста 1	20–15	10–14	0–14	
			баллы $Q$	1	0,5	0,2	
			баллы теста 2	20–15	10–14	0–14	
			баллы $Q$	1	0,5	0,2	
			баллы теста 3	20–15	10–14	0–14	
			баллы $Q$	1	0,5	0,2	
			баллы теста 4	32–20	19–15	0–14	
			баллы $Q$	1	0,5	0,2	
			баллы теста 5	20–15	10–14	0–14	
			баллы $Q$	1	0,5	0,2	
	Технический интеллект	Тест Беннета	баллы теста	39–48 и более	34–38	0–33	
			баллы $Q$	1	0,5	0,2	
	Пространственное мышление	Методика исследования особенностей мышления (МИОМ 7,8)	баллы теста 7	20–15	10–14	0–14	
			баллы $Q$	1	0,5	0,2	
			баллы теста 8	20–15	10–14	0–14	
			баллы $Q$	1	0,5	0,2	
	Эмоциональные	Эмоциональная стабильность	Прогноз-2	баллы теста	6–10	3–5	0–2
				баллы $Q$	1	0,5	0,2
		Нервно-психическая устойчивость	Методика Айзенка. Шкала «нейротизм»	баллы теста	0–6	7–18	19–24
				баллы $Q$	1	0,5	0,2
Поведение в конфликтной ситуации		Поведение в конфликтной ситуации (ПКС 1–5)	баллы ПКС 1	8–12	5–7	0–4	
			баллы $Q$	1	0,5	0,2	
			баллы ПКС 2	8–12	5–7	0–4	
			баллы $Q$	1	0,5	0,2	
			баллы ПКС 3	8–12	5–7	0–4	
			баллы $Q$	1	0,5	0,2	
			баллы ПКС 4	8–12	5–7	0–4	
			баллы $Q$	1	0,5	0,2	
Мотивация		Мотивация успеха и боязнь неудач (МУН) (тест Реана)	баллы теста	12–20	10–11	0–9	
			баллы $Q$	1	0,5	0,2	

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7
Волевые	Ответственность	16–ФЛО шкала G	баллы шкала G	7–10	5–6	1–4
			баллы Q	1	0,5	0,2
	Дисциплинированность	16–ФЛО шкала Q3	баллы шкала Q3	7–10	5–6	1–4
			баллы Q	1	0,5	0,2
Коммуникативные	Организаторские способности	Коммуникативно-организационные способности (КОС)	баллы шкала ОС	66–100	46–65	0–45
			баллы Q	1	0,5	0,2
	Коммуникабельность	КОС	баллы шкала КО	81–100	56–80	0–55
			баллы Q	1	0,5	0,2

3. Исключение из состава кандидатов в потенциальную экспертную группу кандидатов с коэффициентами компетентности потенциального эксперта  $EQ$  менее 15.

4. Определение необходимого количества экспертов в экспертной группе.

Определение необходимого количества экспертов в экспертной группе ( $m$ ) предлагается осуществлять по следующим формулам:

$$m \geq 0,1 \left( 10^{z((y+2,5)/\delta)} \right),$$

$$z = EXP(y),$$

$$y = EXP(-x),$$

$$x = \frac{EQ_{cp} b}{EQ_{max}},$$

где  $b$  – ошибка результата экспертного анализа (от 0 до 1);

$EQ_{max}$  – максимальный коэффициент компетентности эксперта,  $EQ_{max} = 34$ ;

$EQ_{cp}$  – среднее арифметическое значений коэффициентов компетентности потенциальных экспертов с  $EQ$  более 15;

$\delta$  – первая константа Фейгенбаума,  $\delta = 4,669$ .

При допустимой ошибке экспертного анализа в 5% (0,05) и среднем арифметическим значением коэффициентов компетентности экспертов  $EQ_{cp} = 20$  в состав экспертной группы должно входить не менее 11 человек.

5. Формирование экспертной группы.

С учетом полученных значений формирование экспертной группы предлагается осуществлять методом простой выборки (с учетом специфики производственных процессов) из числа потенциальных кандидатов, коэффициент компетентности которых более либо равен  $EQ_{cp}$ . При этом численный состав экспертной группы не должен быть меньше расчетного значения, полученного ранее.

Формирование предварительного списка экспертов группы и оценку уровня их компетентности целесообразно проводить ежегодно с учетом обновления кадрового резерва организации.

**Заключение.** Предлагаемая методика, а также ее цифровая модель, в т.ч. интегрированная в общую цифровую модель управления рисками в области охраны труда организации, позволяет оперативно и эффективно определить количественный и квалификационный состав экспертной группы, сформировать перечень потенциальных кандидатов в состав экспертной группы, а также разноуровневые экспертные группы для последующего анализа эффективности их работы при реализации процедуры идентификации опасностей и оценки профессионального риска. Привлечение в рабочую группу наиболее компетентных экспертов приведет к повышению достоверности экспертных оценок и снизит неопределенность определения уровня профессионального риска.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бирюк, В.А. Методы оценки рисков в системе управления промышленной безопасностью предприятий нефтехимической промышленности / В.А. Бирюк, Ю.А. Булавка, Р.Н. Иманов // Вестн. Ун-та гражд. защиты МЧС Респ. Беларусь. – 2018. – № 4, Т. 2. – С. 437–445.
2. Булавка, Ю.А. Современное состояние и совершенствование методики экспертной оценки профессионального риска на рабочих местах / Ю.А. Булавка // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2013. – № 3. – С. 156–163.

3. Kozhemyatov, K.Y. Analysis of equipment life cycle at oil refinery / K.Y. Kozhemyatov, Yu.A. Bulauka // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 687. – art. No 066038. – DOI:10.1088/1757-899X/687/6/066038.
4. Булавка, Ю.А. Концептуальный подход к оценке профессионального риска на опасных производственных объектах / Ю.А. Булавка, О.О. Смиловенко // Чрезвычайные ситуации: образование и наука, – 2013. – Т. 8, № 1. – С. 125–131.
5. Булавка, Ю.А. Нечетко-множественный подход к экспертной оценке профессиональных рисков на примере условий труда работников нефтеперерабатывающего завода / Ю.А. Булавка // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундаментальные науки. – 2013. – № 12. – С. 59–66.
6. Старовойтов, И.Г. Методы оценки риска в системе управления охраной труда / И.Г. Старовойтов, В.А. Бирюк, Ю.А. Булавка // Вестн. Ун-та гражд. защиты МЧС Респ. Беларусь. – 2018. – № 1, Т. 2. – С. 5–17.
7. Булавка, Ю.А. Совершенствование технологии экспертной оценки профессионального риска на рабочих местах / Ю.А. Булавка // Безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 7. – С. 9–15.
8. Булавка, Ю.А. Развитие комплексной оценки профессионального риска путем учета суммарной вредности условий труда / Ю.А. Булавка // Гигиена и санитария. – 2013. – № 4. – С. 47–54.
9. Булавка, Ю.А. Использование цифровых инструментов интегрированных решений в области охраны труда / Ю.А. Булавка, В.Н. Самусевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2019. – № 11. – С. 72–81.
10. Волохина, А.Т. Научно-методические основы совершенствования систем управления промышленной безопасностью на предприятиях магистрального транспорта газа с использованием компетентного подхода к персоналу : дис. ... канд. тех. наук : 05.26.03 / А.Т. Волохина. – М., 2018. – 163 л.
11. Дюйзен, Е.Ю. Комплексный анализ ситуаций при принятии руководителем качественных управленческих решений / Е.Ю. Дюйзен // Лидерство и менеджмент. – 2015. – Т. 2, № 1. – С. 19–34.
12. Самусевич, В.Н. Выбор состава экспертной группы для оценки профессионального риска / В.Н. Самусевич // Нефть и газ: технологии и инновации : материалы Нац. науч.-практ. конф. : в 3 т. / отв. ред. Н.В. Гумерова. – Тюмень : Тюм. индустр. ун-т, 2020. – Т. 3. – С. 93–96.
13. Кожемятов, К.Ю. Совершенствование подбора человеческих ресурсов для нефтегазовой отрасли / К.Ю. Кожемятов, Ю.А. Булавка, Д.С. Юхно // Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России : сб. тез. XII Всерос. науч.-техн. конф., Москва, 12–14 февр. 2018 г. / РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина. – М., 2018. – С. 493.
14. Булавка, Ю.А. Профессиональный отбор как метод управления рисками и безопасностью на НПЗ / Ю.А. Булавка, Д.С. Юхно // Дальневосточная весна-2018 : материалы 16-й Междунар. науч.-практ. конф. по проблемам экологии и безопасности, Комсомольск-на-Амуре, 27 апр. 2018 г. / редкол. : И.П. Степанова (отв. ред.), Г.Е. Никифорова (зам. отв. ред.). – Комсомольск-на-Амуре : КНАГУ, 2018. – С. 226–228.
15. Булавка, Ю.А. Снижение влияния человеческого фактора в обеспечении промышленной безопасности нефтеперерабатывающих предприятий путем внедрения автоматизированной системы оценки профессиональной пригодности операторов / Д.С. Юхно, Ю.А. Булавка // Молодые ученые в решении актуальных проблем безопасности : материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Железногорск, 20 апр. 2018 г. – Железногорск, 2018. – С. 203–205.
16. Yukhno, D. Reduction of occupational risks for workers of the oil refinery by introducing an automated system for evaluation of operators' professional ability / D.Yukhno, Yu. Bulauka // European and national dimension in research. technology = Европейский национальный контексты в научных исследованиях : Electronic collected materials of X Junior Researchers' Conference, Novopolotsk, May 10–11, 2018 / Polotsk State University ; ed. D. Lazouski [et al.]. – Novopolotsk, 2018. – P. 120–121.
17. Булавка, Ю.А. Автоматизированная оценка профпригодности студентов-выпускников нефтяных вузов как направление обеспечения безопасности жизнедеятельности / Ю.А. Булавка, Д.С. Юхно // Безопасность жизнедеятельности и физическая культура: опыт внедрения ФГОС : материалы VIII Всерос. ежегод. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Нижний Тагил, 28 марта 2018 г. / отв. ред. В.А. Федюнин. – Нижний Тагил : Нижнетагил. гос. соц.-пед. ин-т (филиал) ФГАОУ ВО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т». – С. 18–21.
18. Yukhno, D.S. Reduction of occupational risks for workers of the oil refinery / D.S. Yuhno, Yu.A. Bulauka // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы : сб. материалов XII междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. – Минск : УГЗ, 2018. – С. 429–430.
19. Булавка, Ю.А. Автоматизированная система оценки профпригодности операторов для снижения профессионального риска на НПЗ / Ю.А. Булавка, Д.С. Юхно // Национальная стратегия по снижению рисков ЧС в Республике Беларусь на 2019–2030 годы : сб. материалов междунар. науч.-практ. конф. – Минск : УГЗ, 2018. – С. 179–181.
20. Yukhno, D.S. Reduction of occupational risks for workers of the oil refinery by introducing of automated system for evaluation of professional ability of operators / D.S. Yuhno, Yu.A. Bulauka // Tatarstan UpExPro 2018 : материалы II Междунар. молодеж. конф., Казань, 14–17 февр. 2018 г. – Казань : Изд-во Казан. ун-та, 2018. – С. 101–102.
21. Yukhno, D.S. Decrease of influence of human factor in providing industrial safety at an oil refinery / D.S. Yuhno, Yu.A. Bulauka // Нефть и газ – 2018 : сб. докл. 72-й Междунар. молодеж. науч. конф. Москва, 23–26 апр. 2018 г. – М. : РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2018. – Т. 3. – С. 366.
22. Bulauka, Yu.A. The analysis of professional competence of students of oil higher education institutions by the automated assessment of their professional suitability / Yu.A. Bulauka, D.S. Yuhno // Инновационные подходы

в образовательном процессе высшей школы: национальный и международный аспекты [Электронный ресурс] : электрон. сб. ст. междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию Полоц. гос. ун-та, Новополоцк, 8–9 февр. 2018 г. / под. ред. Ю.П. Голубева, Н.А. Борейко. – Новополоцк : ПГУ, 2018. – С. 329–330.

Поступила 03.12.2020

## SELECTION OF THE EXPERT GROUP FOR ASSESSMENT OF PROFESSIONAL RISK

V. SAMUSEVICH, Yu. BULAUKA

*The following article offers a method for determining the quantitative and qualification composition of the expert group for the implementation of the procedure of the hazard identification and occupational risk assessment. It defines professional and personal qualities and ways of their detection by the expert group. The digitalization of the proposed methodology makes it possible to quickly and efficiently determine the quantitative and qualification composition of the expert group, form a list of potential candidates for the composition of the expert group, form a multi-level base of potential experts for the subsequent analysis of the effectiveness of their work when implementing the procedure for hazard identification and occupational risk assessment. The involvement of the most competent experts in the group will lead to the improvement of expert assessments and reduction in the uncertainty when determining the level of professional risk.*

**Keywords:** labour protection; professional risk; expert group; hazard identification.

УДК 665.7.038.2

**ОЦЕНКА ДИСПЕРГИРУЮЩИХ СВОЙСТВ СУКЦИНИМИДНЫХ ПРИСАДОК  
К СМАЗОЧНЫМ МАСЛАМ**

**Е.И. МАЙОРОВА<sup>1</sup>, К.П. АНТУХ<sup>2</sup>, А.Г. УТКИН<sup>2</sup>,**  
**канд. пед. наук, доц. И.В. БУРАЯ<sup>1</sup>, д-р хим. наук В.Н. БАКУНИН<sup>3</sup>,**  
**канд. техн. наук, доц. А.А. ЕРМАК<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>(Полоцкий государственный университет)

<sup>2</sup>(СООО «ЛЛК-НАФТАН», Новополоцк)

<sup>3</sup>(АО «ВНИИ НП», Москва)

*Рассмотрены стадии получения присадок сукцинимидного типа и методы оценки диспергирующих свойств. Показан механизм действия диспергирующих присадок. В результате проведенных исследований выполнена оптимизация материальных балансов, а также осуществлен подбор оптимальных компонентов для получения сукцинимидных присадок.*

**Ключевые слова:** нефтехимическая промышленность, смазочные материалы, сукцинимидные присадки, амины, диспергирующие свойства.

**Введение.** Современное развитие моторостроения, широкое применение высокопроизводительных машин и механизмов было бы невозможным без использования высококачественных смазочных масел. Совершенствование бензиновых и дизельных двигателей оказывает значительное влияние на расширение ассортимента высокоэффективных присадок, а также на изменение структуры потребления смазочных материалов, связанное с ужесточением требований к качеству и условиям эксплуатации моторных масел с целью увеличения сроков замены и повышения топливной экономичности [1].

Смазочные масла являются рабочим телом, снижающим трение и износ контактирующих металлических поверхностей деталей в узлах и агрегатах машин и механизмов. Основные требования к маслам направлены на поддержание высокого уровня их функциональных свойств, таких как:

- снижение затрат энергии, расходуемой на преодоление сил трения при эксплуатации техники;
- отвод тепла от нагретых деталей в широком диапазоне термомеханических нагрузок и скоростей перемещения трущихся поверхностей;
- сохранение физико-химической стабильности под воздействием внешних условий;
- совместимость с конструкционными материалами и обеспечение экологической безопасности при эксплуатации [2].

Данные требования в т.ч. обусловлены необходимостью повышения надежности работы двигателя и одновременно улучшения его экологичности [3].

Моторное масло в современной химмотологии рассматривается как элемент конструкции двигателя внутреннего сгорания [4], и тенденции в двигателестроении диктуют условия производителям смазочных материалов. Это приводит к внедрению новых решений в технологии производства базовых масел и функциональных присадок.

В настоящее время содержание присадок в моторных маслах составляет от 12 до 20% масс.

Как правило, состав присадок к современным маслам зависит от их функционального предназначения. К основным типам присадок относятся: диспергирующие, моющие (детергенты), загущающие (или вязкостные), депрессорные, противопенные, противоизносные, противозадирные, антиокислительные, антикоррозионные и антифрикционные.

**Основная часть.** Диспергирующие присадки являются основными элементами в композициях присадок. Их доля составляет половину от всех имеющихся присадок в смазочном масле. Они увеличивают дисперсность (от лат. *dispersio* – рассеяние) попадающих в смазочные масла нерастворимых загрязнений, позволяют стабилизировать образующуюся суспензию. Поверхность деталей двигателя предохраняется от отложений нерастворимых загрязнений (продукты неполного сгорания топлива, частицы нагара и другие вещества) за счет диспергирования последних в масле, что не позволяет образовываться осадку из данных компонентов. Диспергирующие присадки сходны по строению с моющими присадками, обладают моющими свойствами, но чаще всего не содержат металлы и являются беззольными. Во время работы двигателя диспергирующая способность смазочного масла, как правило, снижается [5].

Механизм действия диспергирующих присадок многообразен и зависит от их поведения в объеме масла и на поверхности металла [6].

Продукты окисления и разложения топлива и масла, такие как сажа, смола, лак и нагар, плохо растворяются в масле, поэтому отлагаются на поверхности металла. Способность этих материалов к отделе-

нию от масла зависит от размера частиц. Небольшие частицы более склонны оставаться в масле, чем крупные. Таким образом, частицы смолы и сажи как существенные компоненты всех веществ, образующих отложения, должны путем агломерирования увеличиваться в размерах, чтобы получить возможность отделиться от масла. Рост размеров частиц смолы происходит через дипольные взаимодействия, а частиц сажи – через адсорбцию таких полярных примесей, как вода и кислород. В качестве альтернативы частицы сажи захватываются липкой смолой (рисунки 1, А, В). Под влиянием стерических или электростатических факторов частицы с присоединенными к ним молекулами дисперсантов теряют способность слипаться. Дисперсанты состоят из полярной группы, обычно содержащей атомы кислорода или азота, и большой неполярной группы. Полярная группа ассоциируется с полярными частицами, а неполярная удерживает эти частицы во взвешенном в масле состоянии (рисунки 1, С, D). Аналогичным образом действуют нейтральные моющие присадки [7].

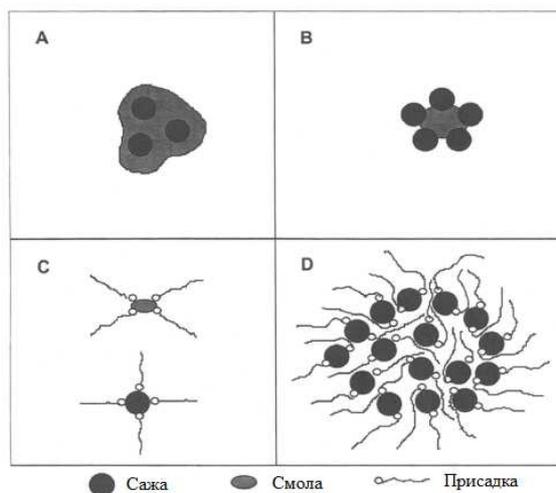


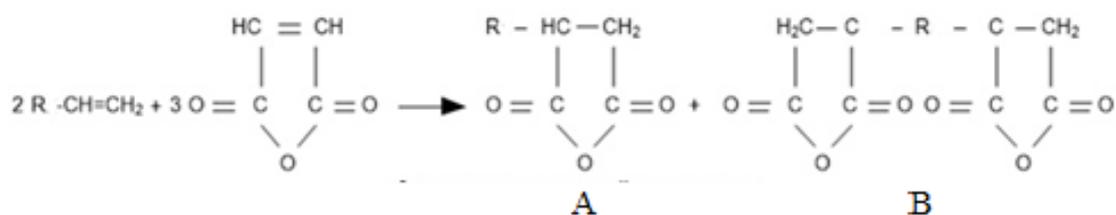
Рисунок 1. – Механизм взаимодействия сажа–смола–присадка

Основной класс диспергирующих присадок, получивший широкое распространение, представлен сукцинимидными присадками. Отличительная особенность сукцинимидных присадок заключается в их эффективном диспергирующем действии, значительно более высоком, чем диспергирующее действие моюще-диспергирующих присадок других типов. Стоит отметить, что сукцинимидные присадки относятся к категории Low SAPS (Low-Sulphated Ash, Phosphorus and Sulphur), т.к. не содержат металлы, серу и фосфор. Диспергирующие присадки данной категории обладают несомненным преимуществом, поскольку металлсодержащие продукты сгорания (так называемая «зола») засоряют фильтры, фосфор- и серосодержащие производные деактивируют каталитические нейтрализаторы.

*Химизм получения сукцинимидных присадок [8]*

1 стадия – взаимодействие олефина с малеиновым ангидридом. При изучении влияния молекулярной массы олефина на выход реакции было установлено, что с увеличением молекулярной массы олефина выход целевого продукта также возрастает [9].

Исследуя взаимодействие димеров и тримеров изобутилена с малеиновым ангидридом, Альдер и Зель установили, что направление и результат реакции зависят от положения двойной связи в олефине [8]. Альдер считает, что с малеиновым ангидридом взаимодействуют лишь  $\alpha$ -олефины, причем взаимодействие происходит по углеродному атому, находящемуся при двойной связи, двойная связь перемещается вглубь молекулы олефина. Взаимодействию же с олефинами с внутренней двойной связью препятствуют стерические факторы [6]. Условно данную реакцию можно представить следующей схемой:





В ходе исследований контроль полноты протекания процесса имидирования был осуществлен посредством ИК-спектрометрии. О полном протекании процесса свидетельствует отсутствие изменений в спектрах в области  $1750\text{--}1500\text{ см}^{-1}$ . Типичная динамика ИК-спектров при протекании процесса имидирования представлена на рисунке 2. Полоса поглощения при  $\sim 1730\text{ см}^{-1}$  соответствует колебаниям имидного фрагмента, две полосы при  $\sim 1640$  и  $\sim 1550\text{ см}^{-1}$  – колебаниям амидного фрагмента.

*Методы оценки диспергирующих свойств.* В литературе описан ряд методов определения состояния дисперсной системы и оценки диспергирующей способности масел, основанных на различных физико-химических особенностях поведения коллоидных систем.

Для оценки диспергирующей способности масел с присадками предложен метод УР-48: окисленное масло разбавляют бензином, смешивают с сажей и после центрифугирования смеси определяют оптическую плотность фугата, которая характеризует количество сажи, диспергированной в масле [10]. Более простой метод основан на прямом определении подвижности диспергированных частиц [6].

Диспергирующие свойства масел по отношению к углеродистым материалам могут быть исследованы хроматографическим методом, который заключается в следующем: масло, содержащее углерод в виде суспензии, протекает под влиянием силы тяжести через трубку, наполненную соответствующим адсорбентом, например, глиной или окисью алюминия. Скоагулированные частицы углерода будут легко адсорбированы в виде сравнительно тонкого слоя в верхней части трубки, более мелкие частицы – на большем расстоянии от входа в трубку, что позволит дать количественную оценку диспергирующей способности масла.

В промышленности для оценки диспергирующих свойств масел проводят тест ASTM D7899-19 «Стандартный метод испытаний для определения дисперсности моторных масел в эксплуатации с помощью метода промокания». Метод основан на том, что при попадании на специальную фильтровальную бумагу масло, должным образом диспергирующее сажу и другие нерастворимые вещества, образует равномерно градуированное пятно. Распределение различных зон будет отражать состояние дисперсности масла. Пока масло растекается по фильтровальной бумаге, оно несет в себе загрязнения, и из-за явления расслоения масляной пленки частицы одинакового размера откладываются на бумаге в одних и тех же концентрических зонах (рисунок 3) [11].

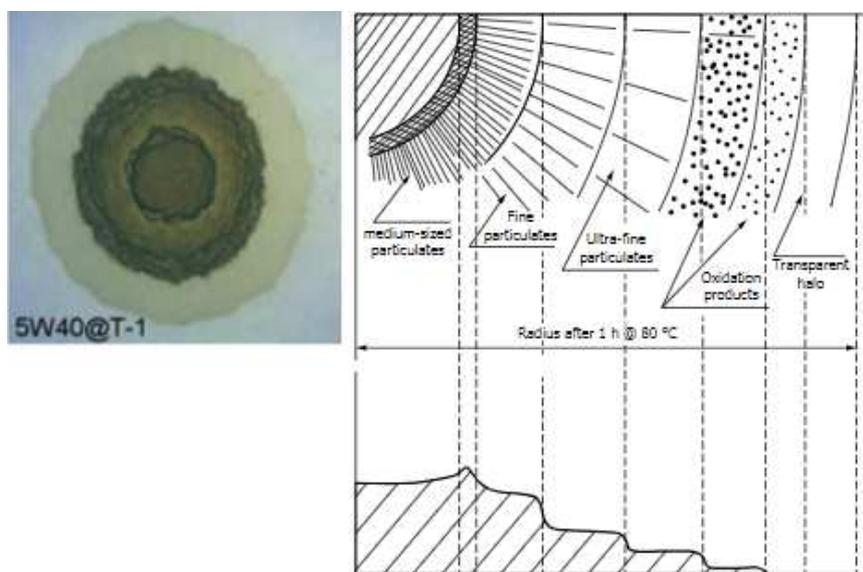


Рисунок 3. – Пример нефтяного пятна и схема распределения различных зон

В СООО «ЛЛК-НАФТАН» разработана методика оценки диспергирующих свойств сукцинимидных присадок, позволяющая проводить оценку диспергирующих свойств дисперсантов всех модификаций. Метод основан на перемешивании испытуемого образца масла с мелкодисперсной сажей. Сажа в данном случае используется для имитации нагара при сгорании дизельного топлива в ДВС. Результатом сажевого теста является разность кинематических вязкостей при  $100\text{ °C}$  испытуемого образца масла до и после введения сажи.

В результате исследования процесса получения сукцинимидных присадок на всех стадиях выявлены зависимости.

На первой стадии с увеличением молекулярной массы полиизобутилена снижается доля полиэтиленаминных цепей и, значит, снижаются полярность и количество доступных для взаимодействия аминогрупп. Следствием являются следующие наблюдаемые в эксперименте факты (таблица):

- диспергирующие свойства (оцененные по методике СООО «ЛЛК-НАФТАН») получаемого сукцинимиды ухудшаются;
- улучшаются результаты теста на совместимость с эластомерами (ASTM D7216) [14].

С увеличением доли малеинового ангидрида в реакционной смеси в диапазоне 0,8–1,6% от стехиометрического количества происходит ухудшение диспергирующих свойств.

Таблица. – Показатели качества сукцинимидных присадок на основе полиизобутилена с различной молекулярной массой

Показатели качества	Нормативный документ	С-1100 М(ПИБ)=1000 г/моль	С-1500 М(ПИБ)=1300 г/моль	С-2500 М(ПИБ)=2300 г/моль
Вязкость кинематическая при 100 °С, сСт	ГОСТ 33-2016	290	250	235
Щелочное число, мг КОН/г	ГОСТ 30050-93	67	42	22
Содержание азота, % масс.	СТБ 2510-2017	2,7	1,7	0,95
Кислотное число, мг КОН/г	ГОСТ 11362-96	3,0	2,8	2,0
Цвет по шкале ASTM	ASTM D1500	2,0	2,5	4,5
Диспергирующие свойства, сСт,	Методика СООО «ЛЛК-НАФТАН»	2–4	5–7	12–15

На второй стадии сукцинимиды, полученные с использованием разветвленных полиэтиленаминов, проявляют лучшие диспергирующие свойства, чем сукцинимиды, полученные с использованием линейных полиэтиленаминов. Возможной причиной подобного поведения является увеличение доли поверхности, приходящейся на фрагменты полиэтиленаминов в общей поверхности сукцинимиды, и, как следствие, увеличение площади контакта с диспергируемыми частицами.

С увеличением массовой доли амина в реакционной смеси:

- диспергирующие свойства получаемого сукцинимиды улучшаются благодаря увеличению доли полиэтиленаминных цепей и, как следствие, увеличению полярности и количества доступных для взаимодействия аминогрупп;
- увеличивается оптическая плотность при 860 нм;
- наблюдается усиление гелеобразования при взаимодействии с моющими присадками сульфатного типа, вероятно, из-за усиления взаимодействия между сульфонатами кальция и сукцинимидами за счет образования водородных связей;
- снижается показатель цвета по шкале ASTM, вероятно, вследствие обесцвечивания олигомеров малеинового ангидрида в результате взаимодействия с аминами.

**Выводы.** Детальный анализ полученных результатов показывает, что при улучшении некоторых показателей качества при варьировании условий синтеза другие показатели могут ухудшаться. Наиболее сбалансированным вариантом по сумме показателей качества на данном этапе исследований является присадка, полученная на основе полиизобутилена с молекулярной массой 1300 г/моль. Оптимальное содержание аминов (предпочтительно разветвленных) в реакционной смеси в данном случае составляет ~60% от стехиометрического, оптимальное содержание малеинового ангидрида ~1,3% от стехиометрического.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Специальные технологии переработки природных энергоносителей. Производство присадок и пакетов присадок к маслам : учеб.-метод. комплекс / С.В. Покровская [и др.]. – Новополоцк : ПГУ, 2014. – 132 с.
2. Золотов, А.В. Композиция гетероорганических соединений как антиокислительная и трибологически активная присадка к моторным маслам с улучшенными экологическими свойствами : дис. ... канд. хим. наук : 02.00.13 / А.В. Золотов. – М., 2014. – 115 л.
3. Смазочные материалы и проблемы экологии / А.Ю. Евдокимов [и др.]. – М. : Нефть и газ, 2000. – 423 с.
4. Чудиновских, А.Л. Разработка научных основ химмотологической оценки автомобильных моторных масел : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.07 / А.Л. Чудиновских. – М., 2016. – 239 л.
5. Данилов, А.М. Применение присадок в топливах / А.М. Данилов. – СПб. : Химиздат, 2010. – 307 с.
6. Кулиев, А.М. Химия и технология присадок к маслам и топливам / А.М. Кулиев. – М. : Химия, 1972. – 211 с.
7. Рудник, Л.Р. Присадки к смазочным материалам. Свойства и применение / Л.Р. Рудник ; пер. с англ. под ред. А.М. Данилова. – 2-е изд. – СПб. : Профессия, 2013. – 928 с.
8. Промышленный технологический регламент цеха № 2 (ТР-2020-02).

9. Манг, Т. Смазки. Производство, применение, свойства / Т. Манг, У. Дрезель. – СПб. : Профессия. 2010. – 925 с.
10. Хицман, Д.О. Качество моторных и реактивных топлив, масел и присадок (по материалам VII Мирового нефтяного конгресса) / Д.О. Хицман, Р.Е. Лимард ; под ред. К.С. Папок и А.Б. Виппера. – М. : Химия, 1970, – 300 с.
11. ASTM D7899-19 Standard Test Method for Measuring the Merit of Dispensancy of In-Service Engine Oils with Blotter Spot Method.
12. ASTM D7216-20a Standard Test Method for Determining Automotive Engine Oil Compatibility with Typical Seal Elastomers.

*Поступила 15.12.2020*

**ASSESSMENT OF SUCCINIMIDE ADDITIVES  
FOR LUBRICATING OILS DISPERSING ACTIVITY**

***K. MAYOROVA, K. ANTUKH, A. UTKIN,  
I. BURAYA, V. BAKUNIN, A. YERMAK***

*The succinimide type additives synthesis stages and methods for evaluating their dispersing properties are considered. The mechanism of dispersant additives action is shown. The optimization of material balances as well as the optimal succinimide additives synthesis components selection was implemented as a result of the research carried out.*

***Keywords:*** *petrochemical industry, lubricants, succinimide additives, amines, dispersing properties.*

УДК 665.7.038.2:547.29

**ВЛИЯНИЕ КАРБОНОВЫХ КИСЛОТ НА ФИЛЬТРУЕМОСТЬ И ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА  
СИНТЕТИЧЕСКОГО НИЗКОЩЕЛОЧНОГО СУЛЬФОНАТА КАЛЬЦИЯ  
(МОЮЩЕ-ДИСПЕРГИРУЮЩЕЙ ПРИСАДКИ К МОТОРНЫМ МАСЛАМ)**

**В.А. ЛЕНЧИКОВ<sup>1</sup>, Д.А. ДОБРОВОЛЬСКИЙ<sup>2</sup>, А.Г. УТКИН<sup>2</sup>,**  
**канд. пед. наук, доц. И.В. БУРАЯ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц. А.А. ЕРМАК<sup>1</sup>**  
<sup>1</sup>(Полоцкий государственный университет)  
<sup>2</sup>(СООО «ЛЛК-НАФТАН», Новополоцк)

*Изучены условия получения синтетического низкощелочного сульфоната кальция (СНСК), добавляемого в моторные масла в качестве моюще-диспергирующей присадки. Исследовано влияние введения карбоновых кислот на стадии синтеза СНСК на наблюдаемую фильтруемость, объемную скорость фильтрации, объемную долю осадка, кинематическую вязкость. Для полученных образцов присадки при помощи метода динамического рассеяния света были установлены средние размеры диспергированных в объеме частиц, определены основные физико-химические показатели. На основании результатов изучения микро- и макроскопических характеристик образцов СНСК выявлены тенденции к улучшению фильтруемости и показателей качества продукта, а также положительное влияние карбоновых кислот на агрегативную устойчивость сульфонатных присадок.*

**Ключевые слова:** моюще-диспергирующие присадки к маслам, смазочные материалы, фильтруемые сульфонатные присадки, сульфонат кальция.

**Введение.** Товарные масла имеют регламентированные показатели качества и обладают рядом специфических эксплуатационных свойств. С целью получения тех или иных марок масел в масляную базовую основу вводят специальные химические вещества – присадки, не все из которых одинаково растворимы в масле. Для обеспечения физической гомогенности эти компоненты вводят в масло в тонко-дисперсном состоянии, образуя тем самым коллоидный раствор. Нарушение устойчивости подобной коллоидной системы, вызванной, как правило, коагуляцией диспергированных частиц, являющихся механическими примесями, приводит к выпадению присадки в осадок и изменению качества масла при хранении, что ухудшает эксплуатационные свойства масел.

Поэтому одним из приоритетных направлений совершенствования качества присадок и пакетов присадок для моторных масел является повышение их коллоидной стабильности [1]. Для достижения требуемого качества присадки необходимо совершенствование технологии производства продукта: оптимизация дозировки и порядка ввода компонентов в реакционную смесь, выбор более эффективных растворителей, подаваемых на различных стадиях получения присадки, организация более глубокой и совершенной очистки от механических примесей при помощи таких процессов, как центрифугирование или фильтрование.

В зависимости от цели использования моторного масла используются нейтральные (ОЩЧ = 0), низкощелочные (ОЩЧ < 50 мг КОН/г) или высокощелочные сульфонаты кальция (ОЩЧ = 50–600 мг КОН/г).

В данном исследовании рассматривается получение синтетического низкощелочного сульфоната кальция (общее щелочное число < 50 мг КОН/г) на основе высокомолекулярной сульфокислоты, в частности алкилбензолсульфокислоты (АБСК), как моюще-диспергирующей присадки к моторным маслам. Получение сульфонатов с низким щелочным числом из синтетических высокомолекулярных сульфокислот, т.е. синтетических кислот средней молекулярной массы 450 или более, сопряжено с определенными проблемами. Кальциевые соли высокомолекулярных сульфокислот представляют собой вязкие материалы, склонные к образованию надмолекулярных комплексов с неупорядоченной структурой, что создает проблемы в процессе их синтеза, а затем эксплуатации. Более того, в процессе синтеза возможно включение в состав образующихся агрегатов частиц гидроксида кальция. Образующуюся дисперсную систему можно классифицировать как лиофобную, в которой удельная свободная поверхностная энергия (поверхностное натяжение) достаточно велика – от нескольких единиц до нескольких сотен (и тысяч) мДж/м<sup>2</sup>; граница фаз выражена достаточно четко. Леофобные дисперсные системы термодинамически неравновесны; большой избыток свободной поверхностной энергии обуславливает протекание в них процессов перехода в энергетически более выгодное состояние. Это сопровождается укрупнением частиц, которое может осуществляться двумя путями: в результате изотермической перегонки и коагуляции.

Любая межфазная граница раздела характеризуется наличием свободной поверхностной энергии. Атомы или молекулы, находящиеся на граничной поверхности твердой или жидкой фазы, изначально обладают большей энергией, чем внутри собственной фазы. Такие системы термодинамически неустойчивы. Условие термодинамической агрегативной устойчивости дисперсной системы можно записать в виде неравенств [2]

$$\left(\frac{\partial \Delta G}{\partial S}\right)_{\sigma} \leq 0, \left(\frac{\partial \Delta G}{\partial r}\right)_{\sigma} \geq 0.$$

Это означает, что при постоянном межфазном натяжении ( $\sigma$ ) энергия Гиббса ( $G$ ) дисперсной системы не должна увеличиваться с ростом межфазной поверхности ( $S$ ) или уменьшением размеров частиц ( $r$ ). Поскольку поверхностная энергия равна произведению поверхностного натяжения на площадь поверхности, то при растущей поверхности раздела она, соответственно, увеличивается. Поэтому от количества мелких диспергированных в объеме присадки частиц во многом зависит агрегативная устойчивость.

В образующейся дисперсной системе возможны взаимодействия между существующими надмолекулярными образованиями, приводящие к укрупнению последних. Дисперсная система в этом случае термодинамически (агрегативно) и кинетически (седиментационно) неустойчива. Потеря агрегативной устойчивости приводит к коагуляции частиц золя гидроксида кальция с последующей их коалесценцией – необратимым слиянием, что приводит к потере седиментационной устойчивости. Более того, агрегация частиц золя может привести к образованию макрофазы гидроксида кальция или же, в присутствии ПАВ, к переходу золя в гель. Существует предположение, что такие структуры обладают особыми реологическими свойствами, т.е. свойством при увеличении деформаций сдвига увеличивать свою вязкость, что существенно затрудняет фильтрацию или делает ее вовсе невозможной. Таким образом, для создания стабильных по своим свойствам сульфонов кальция необходимо повышать их агрегативную устойчивость.

Существуют способы получения сульфонов с низким щелочным числом, в которых предусмотрено использование карбоновых кислот [3]. Предполагается, что карбоновые кислоты предотвращают образование гелеобразных продуктов, снижают вязкость полученной присадки и уменьшают количество образующегося осадка. В результате это обеспечивает получение текучих, фильтрующихся продуктов. Такой эффект, вероятно, является следствием взаимодействия карбоновой кислоты с мелкими фракциями частиц гидроксида кальция, размер которых лежит в области десятков нанометров. Эти частицы обладают большим запасом свободной энергии и поэтому легко вступают в различные взаимодействия, что позволяет проводить их селективное удаление. Также частицы таких размеров, предположительно, могут забивать поры фильтра, что также осложняет процесс фильтрации.

Целью данного исследования является синтез стабильного по свойствам СНСК, обладающего приемлемой фильтруемостью. Для осуществления поставленной задачи на стадии синтеза присадки добавляется уксусная кислота, которая взаимодействует с избыточным основанием с образованием ацетата, который в продукте может быть диспергирован в среде сульфонатного мыла.

**Исследовательская часть. Реагенты.** Для синтеза СНСК использовалась высокомолекулярная алкилбензолсульфокислота. Также в ходе исследования применялись масло-разбавитель SN-150, гидроксид кальция, толуол технический, уксусная кислота техническая «чда», вода дистиллированная. Все вышеперечисленные реагенты соответствовали регламентированным показателям качества. На стадии фильтрации полученного продукта в качестве вспомогательного компонента использовалась диатомовая земля Celite-545.

**Оборудование.** Для проведения реакции нейтрализации использовались трехгорлая колба, подсоединенная к электрической мешалке, термометр и обратный холодильник. Водяная баня использовалась для управления температурой в реакторе. Роторный испаритель – для удаления толуола и воды. Для проведения хромато-масс-спектрометрического анализа – хроматограф Clarus 690. Для определения среднего размера частиц – DLS-спектрометр Malvern Zetasizer Nano ZS.

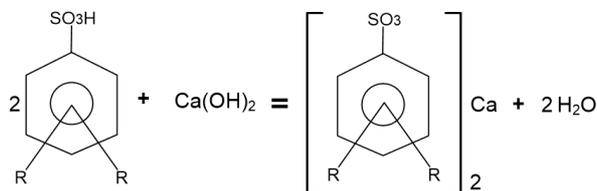
**Методики.** Средняя молекулярная масса сульфокислоты была определена в соответствии с методикой ASTM D-3712. Тест ASTM D-664 был использован для определения общего кислотного числа. Щелочное число продуктов определялось потенциометрически по методу ASTM D4739-17.

**Процедуры.** Качество сырьевой сульфокислоты является определяющим фактором для получения стабильных по свойствам сульфонатных присадок. Поэтому на первом этапе работы были исследованы два образца сульфокислот для выбора наиболее оптимального. Для этого образцы алкилбензолсульфоновых кислот были подвергнуты хромато-масс-спектрометрическому анализу. Основными критериями оценки являлись наличие целевой фракции  $C_{22+}$  и наименьшее количество низкомолекулярных фракций.

На следующем этапе был проведен ряд синтезов СНСК (с содержанием активного вещества 42% масс.) с различным содержанием уксусной кислоты в расчете на весь используемый в синтезе гидроксид кальция (реакции 1, 2).

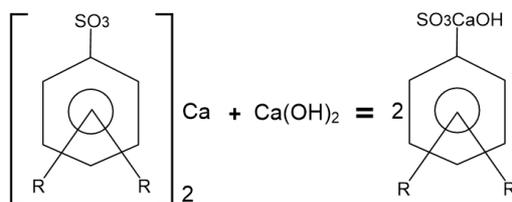
Реакции, происходящие в ходе синтеза, описываются следующими уравнениями:

1) получение нейтрального сульфоната кальция:



(1)

2) получение основного сульфоната кальция:



(2)

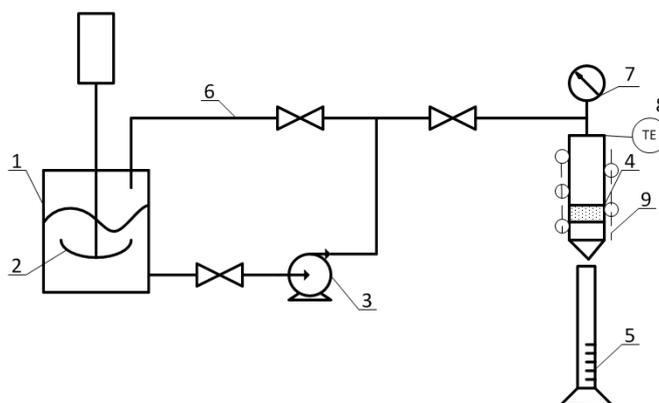
3) получение ацетата кальция:



(3)

После завершения процесса синтеза 100 мл продукта было подвергнуто центрифугированию для определения объемной доли образовавшегося осадка. Также после завершения процесса синтеза раствор СНСК подвергался удалению толуола и воды на вакуумном роторном испарителе при 150 °С и 15 кПа, поскольку, согласно литературным данным, даже небольшое количество воды может существенно ухудшить фильтруемость продукта [4].

Далее обезвоженный продукт подвергался фильтрации в аппарате, моделирующем работу прессы-фильтров (рисунок 1). Фильтрация проводилась при повышенной температуре (в интервале 80–90 °С) и под действием давления 0,2 МПа. В качестве вспомогательного средства был использован намывной слой диатомовой земли. Слой намывался на обеззолненный бумажный фильтр «белая лента».



1 – емкость; 2 – перемешивающее устройство; 3 – насос; 4 – сосуд высокого давления с опорой для фильтра;  
5 – мерный цилиндр; 6 – линия циркуляции фильтрата; 7 – манометр; 8 – электрообогрев;  
9 – термомпара с индикацией температуры

Рисунок 1. – Эскиз лабораторной установки фильтрации

*Результаты, обсуждение и выводы.* Общий вид хроматограмм, полученных в результате анализа образцов алкилбензолсульфокислот, представлен на рисунке 2. Данные хроматограммы были получены при помощи дериватизации *in situ* в инжекторе хроматографа гидросульфатом тетрабутиламмония.

Пики целевых продуктов расположены в регионе 20–26 мин и, как видно, обладают низкой интенсивностью, что может быть связано как с низким выходом дериватизации, так и с неоптимальным подбором условий. В регионе 13–19 мин расположены пики алкилбензолов, вероятно, являющихся сырьевыми при сульфировании. На рисунках 3 и 4 детально представлены описанные регионы.

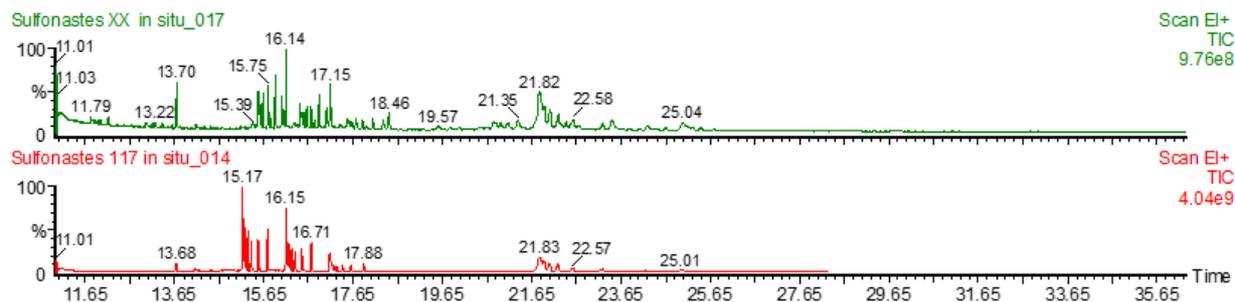


Рисунок 2. – Хроматограммы образцов АБСК

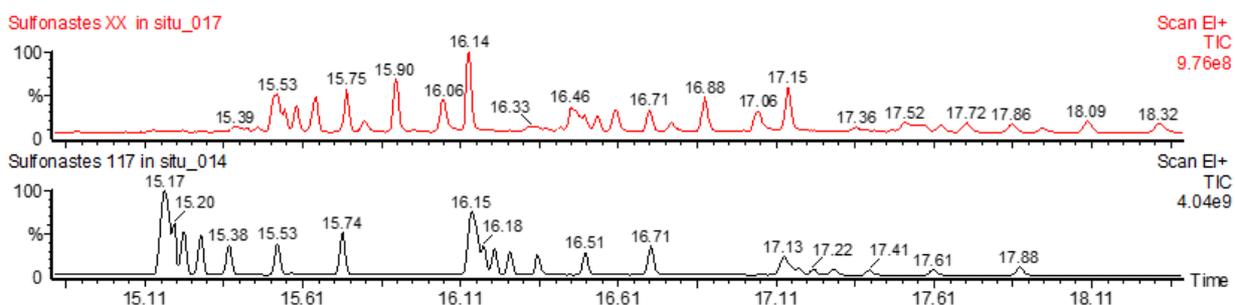


Рисунок 3. – Хроматограммы образцов АБСК – регион, содержащий пики алкилбензолов

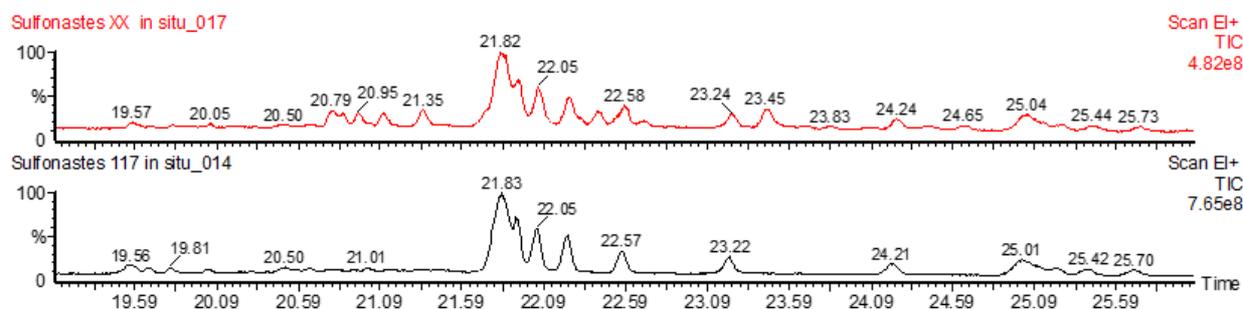


Рисунок 4. – Хроматограммы образцов АБСК – регион, содержащий пики бутиловых эфиров АБСК

Содержание индивидуальных компонентов в данном случае не может быть оценено по интенсивностям пиков, но возможна оценка распределения по длинам алкильных радикалов как в предположительно сырьевых алкилбензолах, так и в целевых кислотах (допуская, что выход дериватизации и степень извлечения в процессе анализа одинаковы для всех гомологов). Результаты данной оценки представлены в таблице 1.

На основании данных таблицы можно сделать вывод, что в образце АБСК № 2 содержится меньшее количество низкомолекулярных компонентов. Поэтому для дальнейших синтезов был выбран данный образец алкилбензолсульфокислоты.

По результатам входного контроля установлено, что выбранная сульфокислота обладает молекулярной массой  $M = 460$ , содержит 84% масс. активного компонента, что удовлетворяет требованиям для производства сульфонатных присадок.

Предпочтительная кинематическая вязкость сульфонатных присадок с низким щелочным числом при 100 °С составляет 80 сСт или меньше. Объемная доля осадка в продукте до фильтрации в наиболее

предпочтительном варианте находится в диапазоне значений от 0,1 до 0,6% об. Для установления интенсивности фильтрации были определены объемные скорости фильтрации и построены диаграммы фильтруемости для трех образцов, представленные на рисунке 5. На основании перечисленных параметров для сравнения полученных результатов фильтрации были введены такие термины, как «хорошо фильтруемый образец» и «плохо фильтруемый образец».

Таблица 1. – Оценочное распределение по длинам алкильных радикалов для образцов АБСК

Компонент	Содержание, мол. %			
	Образец АБСК № 1		Образец АБСК № 2	
	алкилбензолы	АБСК	алкилбензолы	АБСК
C <sub>20</sub>	49,3	74,9	0,0	0,0
C <sub>21</sub>	0,0	0,0	50,9	80,3
C <sub>22</sub>	38,9	25,1	0,0	0,0
C <sub>23</sub>	0,0	0,0	31,7	19,7
C <sub>24</sub>	11,8	0,0	0,0	0,0
C <sub>25</sub>	0,0	0,0	17,4	0,0

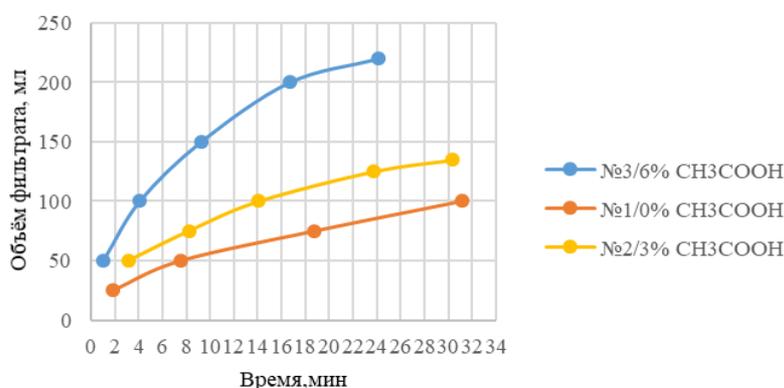


Рисунок 5. – Диаграммы фильтруемости образцов СНСК

Попытка профильтровать образец № 1 оказалась неудачной вследствие высокого содержания осадка в сочетании с высокой вязкостью; наблюдаемая фильтруемость была неудовлетворительной. Этот пример показывает, что получение сульфоната кальция с низким щелочным числом из высокомолекулярной сульфоновой кислоты известным способом получения продукта на принятом в данном исследовании сырье приводит к образованию нефилтруемого продукта. Наблюдаемая фильтруемость в случае образцов № 2 и № 3 улучшилась, о чем свидетельствует положительная динамика роста объемной скорости фильтрации по сравнению с образцом № 1. Однако при фильтрации образца № 2 фильтр быстро забивается, что видно по резкому снижению объемной скорости фильтрации. Физико-химические показатели качества отфильтрованных образцов представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Показатели качества образцов СНСК

Показатель	Номер образца		
	№ 1	№ 2	№ 3
Наблюдаемая фильтруемость	Плохая	Плохая	Хорошая
Объемная доля осадка, % об.	3,50	1,50	1,00
Объемная скорость фильтрации, мл/ч	192,93	266,89	547,72
Общее щелочное число, мг КОН/г	3,72	7,48	12,58
Общее кислотное число, мг КОН/г	1,87	2,07	2,00
Кинематическая вязкость, сСт	120,00	112,00	98,5

Наблюдаются тенденции к снижению объемной доли осадка и кинематической вязкости полученных продуктов. Рост щелочного числа объясняется увеличением количества ацетата кальция в продукте.

Для отфильтрованных образцов также были определены средние размеры диспергированных частиц при помощи DLS-спектрометрии. Полученные результаты представлены на рисунке 6.

Как видно по графикам интенсивности для полученных образцов СНСК, наблюдается тенденция к снижению количества мелких диспергированных частиц по мере увеличения содержания уксусной кислоты в исходной смеси.

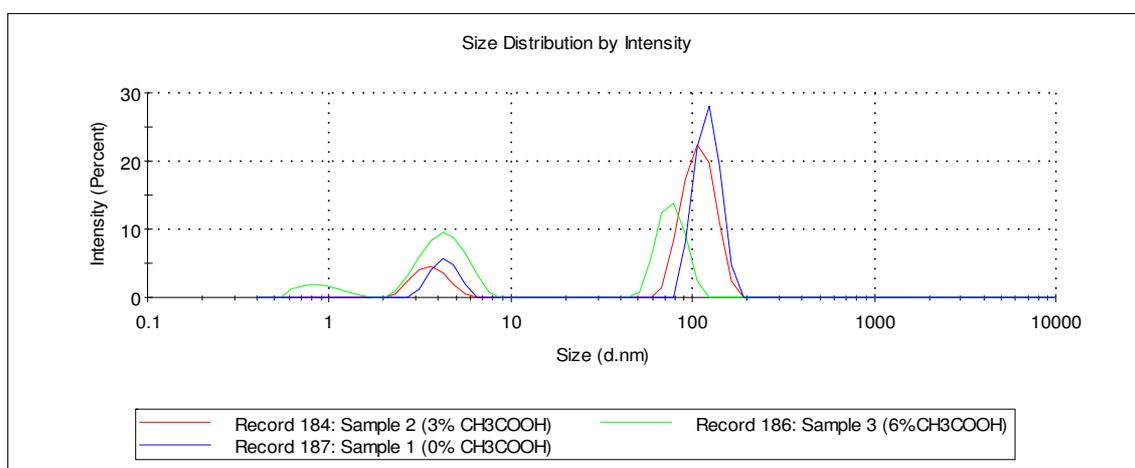


Рисунок 6. – Результаты DLS-анализа образцов СНСК

**Заключение.** Анализируя совокупность полученных результатов, можно сделать вывод, что при синтезе низкощелочного сульфоната кальция на основе высокомолекулярной диалкилбензолсульфокислоты добавление некоторого количества карбоновой кислоты, в частности, уксусной, оказывает положительный эффект на качество продукта. Тенденция к образованию гелеобразных вязких продуктов снижается. Продукт имеет меньшую вязкость и лучшую фильтруемость по сравнению с продуктом, полученным по действующей технологии получения низкощелочного сульфоната кальция.

Однако не все показатели качества достигли приемлемых значений. Продукт обладает слишком высокой вязкостью и объемной долей осадка. В дальнейшем необходимо подобрать наиболее приемлемые, в т.ч. с экономической точки зрения, способы воздействия на коллоидную стабильность получаемых сульфонатных присадок.

Тем не менее, внедрение технологии фильтрации сульфонатных присадок в производство позволит повысить коллоидную стабильность и эксплуатационные характеристики получаемых продуктов, а также снизить энергоёмкость.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рудник, Л.Р. Присадки к смазочным материалам. Свойства и применение / Л.Р. Рудник ; пер. с англ. под ред. А.М. Данилова. – 2-е изд. – СПб. : Профессия, 2013. – 928 с.
2. Громаков, Н.С. Дисперсные системы и их свойства : учеб. пособие по коллоид. химии / Н.С. Громаков. – Казань : Изд-во Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2015. – 91 с.
3. Композиция сульфонатной присадки с низким щелочным числом к смазочным маслам : пат. США EP0875502A1 / К. Эллок, Д. Мулин, Дж. А. Клеверлей, Ч. Г. Бовингтон. – Оpubл. 10.07.2000.
4. Celik, A. Determination of synthesis conditions of neutral calcium sulfonate, so-called detergent-dispersant / A. Celik, B. Besergil // Industrial Lubrication and Tribology. – 2004. – Vol. 56, № 4. – P. 226–230.
5. Главати, О.Л. Физикохимия диспергирующих присадок к маслам / О.Л. Главати. – Киев : Наук. думка, 1989. – 184 с.
6. Liu Yinong. Preparation of Overbased Calcium Alkylbenzene Sulfonate for Formulating Complex Sulfonate Grease / Liu Yinong // China Petroleum Processing and Petrochemical Technology. – 2015. – Vol. 17, No. 1. – P. 89–95.
7. Hou Dianguo. Preparation and Performance of Overbased Complex Sulphonates / Hou Dianguo // China Petroleum Processing and Petrochemical Technology. – 2010. – Vol. 12, No. 1. – P. 38–42.

#### ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

СНСК – синтетический нейтральный сульфонат кальция;  
 АБСК – алкилбензолсульфокислота;  
 ОЩЧ – общее щелочное число;  
 DLS – dynamic light scattering.

Поступила 15.12.2020

**INFLUENCE OF CARBOXYLIC ACIDS ON FILTERABILITY AND QUALITY LEVEL  
OF SYNTHETIC LOW ALKALINE CALCIUM SULFONATE  
(DETERGENT-DISPERSANT MOTOR OIL ADDITIVE)**

**V. LENCHIKOV, D. DABRAVOLSKI, A. UTKIN  
I. BURAYA, A. YERMAK**

*The study examined the conditions of synthetic low alkaline calcium sulfonate (SLCS) synthesis, which is added to motor oils as a detergent-dispersant additive. In particular, the effect of the introduction of carboxylic acids at the stage of SLCS synthesis on such characteristics of the additive as the observable filterability, volume filtration rate, volume fraction of sediment and kinematic viscosity was studied. For the obtained additive samples the average sizes of particles dispersed in the volume were measured using the dynamic light scattering method (DLS) and the basic physicochemical parameters were determined. Based on the results of studying the microscopic and macroscopic characteristics of SLCS samples, tendencies to improve filterability and product quality indicators, as well as the positive effect of carboxylic acids on the aggregate stability of sulfonate additives, are revealed.*

**Keywords:** *detergent-dispersant oil additives, lubricants, filterable sulfonate additives, calcium sulfonate.*

УДК 665.6; 665.76

## ОКИСЛИТЕЛЬНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ГИДРОКРЕКИНГОВЫХ БАЗОВЫХ МАСЕЛ И СПОСОБЫ ЕЕ ПОВЫШЕНИЯ

**П.Ф. ГРИШИН**, канд. техн. наук, доц. **А.А. ЕРМАК**  
(Полоцкий государственный университет)

*Представлено обобщение литературных данных о влиянии химического состава и происхождения масел на их устойчивость к окислению молекулярным кислородом. Рассмотрены причины низкой устойчивости к окислению глубоочищенных гидрокрекинговых масел, механизм процесса окисления углеводов различного строения и их смесей. Систематизированы факторы, влияющие на окислительную стабильность масел. Приведены результаты изучения влияния термообработки глубоочищенного гидрокрекингового масла на его оптические характеристики – коэффициент пропускания света с различной длиной волны. Показана возможность количественной оценки интенсивности окисления масел по изменению их оптических характеристик. Выявлены кинетические и термодинамические закономерности процесса окисления гидрокрекингового масла. Показано, что кинетическая кривая окисления гидрокрекингового масла имеет стадию самоторможения продуктами окисления. Рассмотрены способы повышения устойчивости гидрокрекинговых базовых масел к окислению кислородом воздуха. В качестве наиболее эффективного способа повышения окислительной устойчивости глубоочищенных гидрокрекинговых масел предложено введение в их состав ингибиторов процесса радикально-цепного окисления углеводов.*

**Ключевые слова:** гидрокрекинговые базовые масла, химический состав, окислительная стабильность, механизм и факторы процесса окисления углеводов, оптические характеристики, коэффициент пропускания света, кинетика и термодинамика окисления, ингибиторы окисления масел.

**Введение.** Использование гидрогенизационных процессов при производстве базовых масел позволяет получать высококачественные гидрокрекинговые товарные масла с улучшенными техническими характеристиками по сравнению с традиционными минеральными маслами. Гидрокрекинговые базовые масла обладают высоким индексом вязкости, лучшей приемистостью к присадкам, более экологически чистые [1; 2]. Однако у глубоочищенных гидрокрекинговых базовых масел имеются и недостатки. В частности, они характеризуются низкой устойчивостью к автоокислению кислородом воздуха при хранении, что приводит к изменению их цвета и химического состава, повышению коррозионной активности, образованию осадка. В связи с этим выявление причин и факторов, влияющих на окислительную стабильность гидрокрекинговых базовых масел, а также поиск способов ее повышения являются актуальной задачей. В настоящей статье систематизированы современные представления о механизме окисления углеводов, входящих в состав гидрокрекинговых масел, и результаты изучения изменения оптических характеристик образца глубоочищенного гидрокрекингового масла в процессе его термоокислительной обработки.

**Основная часть.** Подробные сведения по вопросам окисления углеводов различного строения, их смесей, а также отдельных нефтяных фракций и масел молекулярным кислородом, приведены в фундаментальной работе Н.И. Черножукова и С.Э. Крейна [3]. Наибольшей стабильностью обладают ароматические углеводороды с короткими боковыми цепями. Они окисляются с образованием продуктов уплотнения. При увеличении длины цепей, как правило, стабильность углеводов снижается. Нафтеноароматические углеводороды окисляются активно с образованием ряда продуктов, в т.ч. смол. Нафтеновые и парафиновые углеводороды масел при значительной продолжительности окисления менее стабильны, чем ароматические, и образуют в основном кислоты и оксикислоты.

Стабильность масел в основном определяется количеством и особенно строением содержащихся в них ароматических углеводов. При введении во фракцию насыщенных углеводов до 10% масс. ароматических соединений без боковых цепей или с короткими боковыми цепями, а также углеводов, содержащих фенильные радикалы, резко тормозится окисление смеси. Фракции ароматических углеводов с длинными боковыми цепями эффективны лишь при концентрации более 20% масс. Стабильность смеси насыщенных и ароматических углеводов не аддитивна стабильности составляющих смесь компонентов.

Фракции нафтеноароматических углеводов, добавляемые к насыщенным углеводам, направляют процесс окисления в сторону образования продуктов глубокого уплотнения и снижают выход кислых продуктов. При изучении состава продуктов окисления большого количества индивидуальных

углеводородов экспериментально установлено наличие у них функциональных групп, соответствующих перекисным соединениям, свободным кислотам, спиртам, фенолам, соединениям с карбонильной группой. Кроме того, были выделены  $H_2O$ ,  $CO_2$  и летучие кислоты. Характеризуя свойства отдельных групп продуктов окисления, авторы указывают, что спирты, альдегиды, кетоны, кислоты, сложные эфиры и смолы растворяются в окисляемых углеводородах. Остальные соединения или малорастворимы, или вообще нерастворимы в углеводородах и выпадают в осадок.

Экспериментально доказано, что первичными устойчивыми продуктами окисления углеводородов являются гидроперекиси [3]. Их распад порождает в веществе активные частицы – свободные радикалы, количество которых вследствие разветвления цепи быстро возрастает во времени. Достаточно появиться одному свободному радикалу, чтобы был возможен процесс их размножения. Свободные радикалы представляют собой либо осколки молекул, либо молекулы, находящиеся в электронно-возбужденном состоянии. Они содержат неспаренный электрон и обладают свободной валентностью, большой химической активностью и электронейтральны. Образование первичных радикалов может происходить за счет энергии термического или фотохимического воздействия или при наличии металлов с переменной валентностью. Накопление в системе гидроперекиси R-O-O-H, которая является главным промежуточным продуктом окисления, обуславливает автоускорение процесса, т.к. она распадается с образованием свободных радикалов. По окончании индукционного периода окисления скорость реакции вырожденного разветвления намного превышает скорость реакции зарождения радикалов из исходных углеводородов. Поэтому реакция распада перекисей в развивающейся реакции является практически главным источником свободных радикалов в системе. Вслед за образованием гидроперекисей появляются продукты глубокого окисления. Многочисленные экспериментальные данные свидетельствуют, что конечным продуктом распада гидроперекисей являются спирты, кетоны, альдегиды, карбоновые кислоты. Кроме того, перекиси могут вступать в реакции конденсации с карбонильными соединениями с образованием оксильных перекисей, распадающихся на кислоту, альдегид и водород.

Перекиси могут подвергаться повторной пероксидации с образованием многоатомных гидроперекисей, распадающихся с образованием кислородсодержащих осколков и воды, а также принимать участие в реакциях окислительной полимеризации. Изучение кинетических закономерностей окисления углеводородов позволило установить, что скорость их окисления в основном определяется концентрацией перекисных радикалов  $ROO^\bullet$ . Последняя зависит от соотношения скоростей образования и гибели свободных радикалов. Следовательно, для подавления процессов окисления следует уменьшать концентрацию перекисных радикалов.

Внедрение кислорода в молекулы углеводородов парафиновых, нафтеновых, нафтоароматических, ароматических и непредельных при их окислении в жидкой фазе происходит между C-H-связью (а не между C-C, C=C и C-H-связями ароматического кольца) с образованием гидроперекиси. У парафиновых и нафтеновых углеводородов легче всего окисляется третичная СН-группа. Группа четвертичного углерода не окисляется сама и препятствует окислению ближайших к ней C-H-групп (даже третичных). Пероксидации способствует присутствие ароматического кольца, двойной связи, эфирного кислорода, при этом она направлена на ближайшую к ним алифатическую или алициклическую C-H-связь.

Исследования химического состава остаточных продуктов процесса гидрокрекинга вакуумных газойлей показало, что они состоят преимущественно из парафино-нафтеновых углеводородов, небольшого количества ароматических соединений и смол и имеют ультранизкое содержание серы [4; 5]. Таким образом, одной из основных причин низкой окислительной стабильности гидрокрекинговых масел, полученных из остаточных продуктов процесса гидрокрекинга вакуумных газойлей, является их химический состав. После удаления в ходе депарафинизации парафинов нормального строения и парафинонафтеновых соединений с длинными алкильными заместителями, обладающих высокой температурой плавления, в составе депарафинизированного масла остаются низкозастывающие углеводороды, содержащиеся в своем составе наименее химически стабильные третичные атомы углерода, находящиеся в молекулах изоалканов и алкильных заместителях нафтеновых углеводородов. Практически полное отсутствие в составе таких масел природных антиокислителей, в качестве которых выступают ароматические и серосодержащие соединения [6], и приводит к их низкой устойчивости к окислению.

Помимо химического состава на окисление углеводородов в жидкой фазе также влияют следующие факторы: концентрация кислорода, продолжительность окисления, температура окисления, воздействие света, площадь соприкосновения масла с кислородом и концентрация растворенного в масле кислорода.

С увеличением концентрации кислорода скорость окисления возрастает. Имеются данные [7], что при низкой концентрации кислорода в случае окисления трансформаторных масел преобладают реакции окислительной конденсации, что приводит к накоплению продуктов уплотнения. Окислительные реакции

протекают как на поверхности раздела масло–воздух, так и в объеме масла. Имеет место ускорение окисления нефтяных масел с уменьшением толщины его слоя. В случае окисления в условиях доступа воздуха

к поверхности масла, когда низкомолекулярные продукты окисления остаются в основном в масле, идут вторичные реакции конденсации продуктов окисления с образованием осадка. Очевидно, что если добиться практически полного удаления из масла растворенного в нем кислорода и исключить возможность соприкосновения масла с кислородом, можно предотвратить процесс его окисления. Исследование изменения свойств различных групп углеводов при длительном термостатировании в инертной среде – в запаянных ампулах в течении 1500 ч в жидкостной бане при 100 °С, показали следующее [7]:

– при отсутствии кислорода парафиновые и нафтенновые углеводороды не выделяют водород и остаются бесцветными, а ароматические углеводороды темнеют и выделяют водород;

– при наличии следов кислорода парафиновые и нафтенновые углеводороды не изменяются по цвету, но выделяют водород, а ароматические углеводороды темнеют и выделяют водород.

Отсюда следует, что на стадии инициирования при отсутствии кислорода или при наличии его следов парафиновые и нафтенновые углеводороды более устойчивы к окислению, чем ароматические углеводороды.

В зависимости от состава масел и условий окисления кинетические кривые, характеризующие окисление масел во времени, различаются. Для масел неглубокой очистки с достаточно большим содержанием ароматических углеводов имеет место кинетическая кривая, для которой в начальной стадии окисления характерна автокаталитическая реакция, а в конечной стадии – самотормозящаяся реакция. Для этого типа кривой можно четко дифференцировать следующие периоды процесса. Начальная стадия, в течение которой не наблюдается видимых изменений масла, так называемый индукционный период. Вслед за периодом индукции процесс вступает в автокаталитическую стадию, т.е. в период самоускоряющейся реакции, вызванной в основном распадом образовавшихся гидроперекисей, ведущих вырожденное разветвление, на радикалы. Затем наступает период постоянной скорости процесса, в котором скорости реакций образования и гибели свободных радикалов равны. В этот период образуются продукты окисления (фенольного типа), способные тормозить процесс. Когда концентрация этих продуктов оказывается достаточной, наступает последний период процесса – период самоторможения. Для глубокоочищенных масел, практически не содержащих ароматические углеводороды, стадия самоторможения может быть связана с накоплением смол. Смолистые продукты ароматического характера являются антиокислителями. Однако смолы нафтенного происхождения менее эффективно тормозят окисление, а иногда даже его ускоряют. Поэтому для глубокоочищенных масел кинетическая кривая может не иметь периода самоторможения, а после завершения индукционного периода принять вид кривой, характерной для ускоряющейся автокаталитической реакции.

Определяющее влияние на скорость и направление окислительных реакций оказывает температура. Поэтому важно установить связь между температурой и скоростью окисления масла. Обычно эта зависимость условно выражается температурным коэффициентом скорости окисления, определяющим, во сколько раз увеличится скорость окисления при повышении температуры на 10 °С. Этот коэффициент не постоянен, а зависит от выбранного температурного интервала, состава масла, условий окисления параметра, характеризующего степень (скорость) окисления (количество поглощенного кислорода, индукционный период окисления, выход летучих кислот, кислотное число, осадок и др.). Температурный коэффициент выше у нафтенновых углеводов масла (1,8–1,9) и ниже у ароматических углеводов (1,4 для тяжелой ароматики).

При низких температурах накапливаются первичные продукты окисления – перекиси, при более высоких – вторичные продукты превращения перекисей, в частности, спирты и кислоты, наконец, при высоких – продукты диссоциативного окисления, в т.ч. вода, СО и СО<sub>2</sub> и др. При одной степени окисления (по количеству поглощенного кислорода) повышение температуры вызывает у насыщенных углеводов масла увеличение выхода летучих кислот, а у ароматических – осадка, продуктов глубокого уплотнения. При различных температурах составы конечных продуктов окисления различных масел при том же количестве поглощенного кислорода могут существенно отличаться.

Световая энергия также является активным фактором инициирования окислительных цепей в углеводородных смесях. Для образования свободных радикалов под действием квантов света необходимо, чтобы кванты поглощаемого света обладали достаточной энергией. Облучение светом длиной 250–400 нм может вызвать диссоциации связей С-С или С-Н в углеводородах. Углеводороды слабо поглощают свет в этой области. Окрашенные масла быстрее темнеют и окисляются на свету, чем слабоокрашенные или бесцветные. По-видимому, вещества, окрашивающие масла, – смолы, являются сенсбилизаторами. Сенсбилизаторы интенсивно поглощают свет и передают энергию окисляемому субстрату, распадающемуся на свободные радикалы. Скорость фотохимического окисления углеводов пропорциональна интенсивности света. Как показали исследования, даже непродолжительное нахождение гидрокрекинговых масел на свету

приводит к увеличению их оптической плотности, сопровождающемуся снижением коэффициента пропускания света и ухудшением цвета. При этом, при прочих равных условиях, при увеличении глубины очистки масла от примесей степень изменения вышеуказанных свойств, а, следовательно, интенсивность процессов автоокисления входящих в его состав углеводов, увеличивается [8].

Скорость окисления масла зависит и от концентрации растворенного в нем кислорода. Барботирование содержащего кислород газа, например, воздуха, через масло, ускоряет окисление масла благодаря более интенсивному растворению ввиду увеличения поверхности соприкосновения масла с газом в многочисленных пузырьках. Чем мельче образующиеся пузырьки (при постоянной скорости газа), тем больше в масле будет растворено кислорода.

Таким образом, помимо низкой окислительной стабильности, связанной с особенностью химического состава, интенсификации процессов окисления гидрокрекинговых масел способствуют: повышенная температура, облучение светом и контакт с кислородом воздуха. С увеличением глубины очистки масла и уменьшением содержания в нем смол интенсивность процесса окисления гидрокрекинговых масел увеличивается. При этом увеличивается и количество образующегося осадка. Так, при снижении содержания смол в масле с 0,95 до 0,06% масс. массовая доля осадка при окислении образцов в условиях ГОСТ 981 увеличилась в 2 раза. Изменилась и окраска глубокоочищенного масла – от бесцветной до насыщенно желтой. Кривые изменения коэффициента пропускания света позволяют оценить термодинамику (рисунок 1) и кинетику (рисунок 2) процесса окисления глубокоочищенного гидрокрекингового масла.

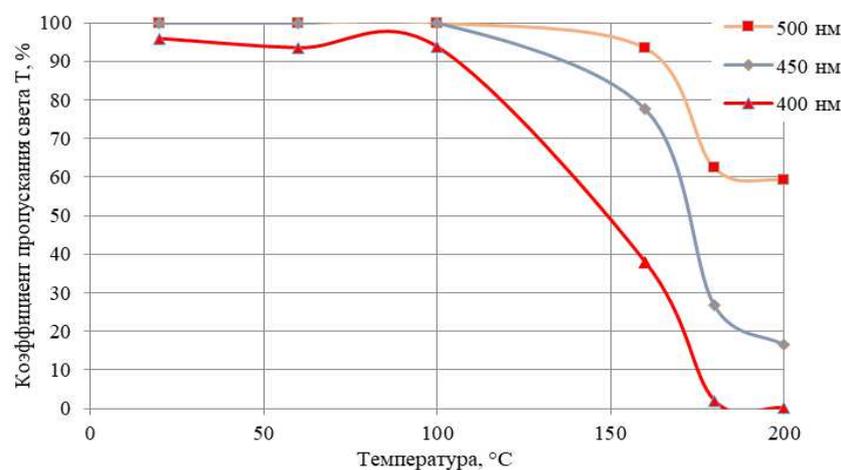


Рисунок 1. – Изменение коэффициента пропускания света с различной длиной волны в результате термостатирования глубокоочищенного гидрокрекингового масла в течение 60 минут в условиях ГОСТ 20354

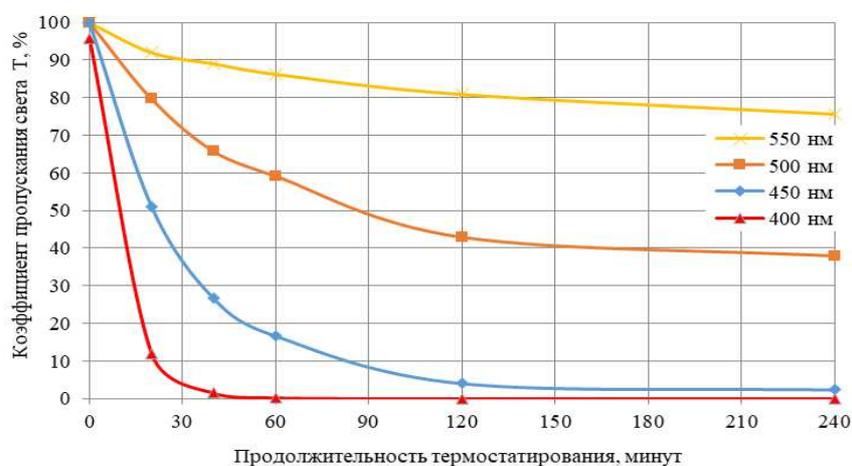


Рисунок 2. – Изменение коэффициента пропускания света с различной длиной волны в результате термостатирования глубокоочищенного гидрокрекингового масла при 200 °C в условиях ГОСТ 20354

При температуре ниже 100 °С исследуемый образец практически не окисляется, а затем при повышении температуры до 180 °С наблюдается интенсивное окисление масла. При дальнейшем повышении температуры до 200 °С интенсивность процесса окисления снижается.

При температуре 200 °С индукционный период окисления исследуемого образца масла не превышает 1 мин. Затем в течение 20 мин в масле накапливаются продукты окисления, что приводит к резкому увеличению его оптической плотности и снижению коэффициента пропускания света. Постепенно скорость окисления снижается, а при термостатировании более 120 мин окислительные процессы в масле существенно замедляются, но не прекращаются. Так, если через 60 мин термостатирования образец становится полностью непрозрачным для света с длиной волны 400 нм, то при большей длине волны наблюдается незначительное снижение коэффициента пропускания света, что связано с увеличением оптической плотности образца в результате накопления в нем продуктов окисления. Таким образом, кинетическая кривая переходит в стадию самоторможения продуктами окисления, которые начинают выступать в качестве ингибиторов процесса окисления.

Известно, что наиболее распространенным способом повышения устойчивости углеводородных масел к окислению в присутствии кислорода воздуха и при воздействии температуры является введение в их состав ингибиторов окисления, механизм действия которых заключается во взаимодействии пероксидных радикалов, образующихся при распаде первичных гидроперекисей, с молекулой ингибитора. В качестве ингибиторов радикально-цепного окисления углеводородов чаще всего используются алкилированные фенолы, например, 2,6-дитретичный бутил-4-метилфенол (ионол или Агидол-1), и алкилароматические амины [7].

Восприимчивость масел к присадкам, в т.ч. ионолу, повышается по мере снижения концентрации в масле ароматических углеводородов. Состав насыщенной части масла в значительно меньшей степени влияет на восприимчивость к присадке. Отсюда следует, что практически из любого нефтяного сырья можно получить высококачественное масло путем глубокой очистки, позволяющей оставить в масле 8–20% ароматических углеводородов, и добавления к базовому маслу 0,2–0,5% (масс.) ионола. По данным [7], трансформаторные масла, полученные гидрокрекингом из сибирских нефтей с последующей депарафинизацией и ингибированные ионолом, по своим качественным показателям, в т.ч. по противокислительной стабильности, превосходят обычные минеральные масла.

В эксплуатационных условиях эффективность действия антиокислительных присадок, в т.ч. ионола, намного ниже, чем при испытаниях в лабораторных условиях. Однако более 20-летний опыт эксплуатации масел, ингибированных ионолом, показывает, что его эффективность все же достаточно высока, особенно для масел глубокой очистки, содержащих относительно мало ароматических углеводородов. Известно также, что при смешении неингибированного и ингибированного ионолом масел при концентрации в смеси присадки ниже 0,05% масс. она проявляет себя как проокислитель.

Получение неингибированных масел с оптимальным химическим составом, обеспечивающим высокую стабильность, является крайне сложной задачей. Такие масла могут быть получены из особо отборного сырья путем относительно неглубокой очистки, в результате которой масло содержит достаточное количество ароматических углеводородов, способных эффективно тормозить окисление насыщенных углеводородов. Стабильные неингибированные масла могут быть получены путем компаундирования достаточно глубоко очищенного масла и фракции ароматических, в основном фенантроновых углеводородов, в количестве от 1 до 5% (по массе) [7].

**Заключение.** Гидрокрекинговые базовые масла благодаря своему химическому составу обладают хорошими техническими характеристиками, однако имеют склонность к окислению кислородом воздуха, накоплению продуктов окисления и образованию осадка. Интенсификации процессов окисления гидрокрекинговых масел способствуют: повышенная температура, облучение светом и контакт с кислородом воздуха. Интенсивность окисления гидрокрекингового масла резко увеличивается с повышением температуры выше 100 °С. Кинетическая кривая окисления гидрокрекингового масла имеет стадию самоторможения продуктами окисления. Потенциально наиболее эффективным способом повышения окислительной устойчивости глубокоочищенных гидрокрекинговых масел является введение в их состав ингибиторов процесса радикально-цепного окисления углеводородов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Petro-Canada Lubricants Handbook 2017. Industry-leading products for improved business performance. Petro-Canada Lubricants Inc. Mississauga, Ontario, Canada. – 2017. – P. 228.
2. Технология и маркетинг гидрокрекинговых базовых масел [Электронный ресурс] / Автомобильные масла и смазки. Масла ConocoPhillips. – Режим доступа: <http://masla55.ru/3>. – Дата доступа: 26.11.2020.

3. Черножуков, Н.И. Окисляемость минеральных масел / Н.И. Черножуков, С.Э. Крейн. – М. : Гостоптехиздат, 1959. – 370 с.
4. Свойства и перспективные направления переработки остаточного продукта процесса «Юникрекинг» / А.А. Ермак [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2015. – № 11. – С. 115–120.
5. Pyrolysis of high-boiling product fractions from petroleum vacuum distillate hydrocracking / Gustav Sebor [et al.] // Fuel Processing Technology. – 1994. – V. 40, – P. 49–59.
6. Гуреев, А.А. Химмотология / А.А. Гуреев, И.Г. Фукс, В.Л. Лашхи. – М. : Химия, 1986. – 368 с.
7. Липштейн, Р.А. Трансформаторное масло / Р.А. Липштейн, М.И. Шахнович – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
8. Гришин, П.Ф. Перспективный метод перколяционной очистки гидрокрекинговых масел / П.Ф. Гришин, А.А. Ермак // Актуальные задачи нефтегазохимического комплекса : материалы науч.-практ. конф., 19–20 нояб. 2020 г. – М. : ВНИПИнефть, 2020. – С. 63–64.

Поступила 14.12.2020

### OXIDATIVE STABILITY OF HYDROCRACKING BASE OILS AND WAYS TO IMPROVE IT

*P. HRYSHYN, A. YERMAK*

*A summary of the literature data on the effect of the chemical composition of oils on their resistance to oxidation by molecular oxygen is presented. The reasons for the low oxidation resistance of deep-refined hydrocracking oils, the mechanism of the oxidation of hydrocarbons of various structures and their mixtures are considered. The factors affecting the oxidative stability of oils are systematized. The results of studying the effect of heat treatment of deep – refined hydrocracking oil on its optical characteristics-the light transmission coefficient with different wavelengths-are presented. The possibility of quantifying the oxidation intensity of oils by changing their optical characteristics is shown. Kinetic and thermodynamic regularities of hydrocracking oil oxidation are revealed. It is shown that the kinetic curve of hydrocracking oil oxidation has a stage of self-inhibition by oxidation products. methods of increasing the stability of hydrocracking base oils to oxidation by air oxygen are considered. As the most effective way to increase the oxidative stability of deep-refined hydrocracking oils, the introduction of inhibitors of the radical chain oxidation of hydrocarbons into their composition is proposed.*

**Keywords:** *hydrocracking base oils, chemical composition, oxidative stability, mechanism and factors of the hydrocarbon oxidation process, optical characteristics, light transmittance, kinetics and thermodynamics of oxidation, oil oxidation inhibitors.*

УДК 665.7:629.1:614.8.084

**ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОБРАЩЕНИИ  
С НЕФТЕПРОДУКТАМИ НА АВТОЗАПРАВОЧНЫХ СТАНЦИЯХ****И.Н. КУЗЬМЕНОК***(РУП «Белоруснефть-Минскавтозаправка», Минск),**канд. техн. наук, доц. Ю.А. БУЛАВКА**(Полоцкий государственный университет)*

*Рассмотрены актуальные вопросы, связанные с обеспечением безопасности при обращении с нефтепродуктами на автозаправочных станциях, на примере АЗС «Белоруснефть», которые являются конечным звеном системы нефтепродуктообеспечения Республики Беларусь и помимо заправки техники топливом осуществляют продажу различных принадлежностей к транспортным средствам, их техническое обслуживание и мойку. Проанализирована организация безопасности труда персонала АЗС «Белоруснефть». Приведены факторы риска для жизни и здоровья пользователей при эксплуатации АЗС. Определено, безопасность эксплуатационных режимов на АЗС напрямую связана не только со своевременностью обнаружения неисправностей в эксплуатационный период, но и с адекватным поведением пользователей АЗС. Установлено, что значительное влияние на безопасную эксплуатацию АЗС зачастую оказывает человеческий фактор, обусловленный отсутствием специальной подготовки и недостаточной обученностью пользователей основным составляющим безопасной эксплуатации автозаправочных станций.*

**Ключевые слова:** автозаправочная станция, безопасность, фактор риска, взрывопожароопасность.

**Введение.** В настоящее время, с интенсивным экономическим ростом и прогрессом человечества, растет количество мото- и автотехники. Следствием данного процесса является увеличение оборота топлива на автомобильных заправочных станциях (АЗС). Как объект транспортной инфраструктуры, АЗС предназначена для заправки топливами, смазочными маслами, пластичными смазками, снабжения водой и воздухом транспортных средств, а также для продажи горюче-смазочных материалов (бензинов, дизтоплив, сжиженных углеводородных газов, смазочных масел, пластичных смазок, эксплуатационных жидкостей), которые могут расфасовываться в мелкую тару. Помимо этого, реализуются запасные части к автотранспортным средствам и осуществляется оказание услуг по техническому обслуживанию транспорта. На отдельных АЗС ведут прием от владельцев индивидуального транспорта отработанных смазочных масел.

Автозаправочная станция как конечное звено системы нефтепродуктообеспечения включает в себя комплекс зданий, сооружений и оборудования на ограниченном по площади участке, осуществляющий определенные технологические операции приема, хранения и выдачи нефтепродуктов, являющихся легковоспламеняющимися и горючими жидкостями, что увеличивает риски возникновения взрыво- и пожароопасных ситуаций, аварий и чрезвычайных ситуаций, способных привести к травмированию и гибели людей и значительному материальному ущербу как на самой АЗС, так и на объектах прилегающих к ним территорий [1–3]. Опасность объектов нефтепродуктообеспечения усугубляется при возникновении чрезвычайных ситуаций, связанных с их функционированием. Наибольшую опасность представляют аварии с возникновением очага возгорания на АЗС. В связи с этим система безопасности эксплуатационных режимов на АЗС базируется на трех составляющих: промышленной, экологической и социальной [4].

Вместе с тем ежедневно тысячи пользователей, посещающих АЗС, воспринимают данные объекты повышенной опасности как кафетерии и магазины по реализации потребительских товаров, зачастую не задумываясь об объемах хранимых легковоспламеняющихся и горючих жидкостей и их взрывопожароопасных свойствах, об уровне риска для собственной жизни и здоровья [5].

Цель данного исследования заключалась в изучении проблем, возникающих при обеспечении безопасности при обращении с нефтепродуктами на автозаправочных станциях, на примере АЗС «Белоруснефть».

**Результаты и их обсуждение.** Практика работы показывает, что нефтепродукты на АЗС легко воспламеняются от открытого огня, например, незатушенной сигареты и спички, зажигалки, используемой для подогрева механизма в морозную погоду; нагретой до высокой температуры поверхности

оборудования, например, работающего двигателя транспортного средства; небольшой искры из-за быстрого закрытия крышки люка бензобака либо проезжающей мимо машины; теплового проявления механической и электрической энергии (искры от короткого замыкания электрооборудования, накопленных зарядов статического электричества при использовании пластмассовых канистр либо стеклянной тары, забивке топливораздаточного пистолета в горловине бензобака механическими примесями); даже результаты жизнедеятельности микроорганизмов могут привести к воспламенению топлив [6–10].

Для обеспечения безопасности на АЗС действует ряд нормативных правовых актов, регламентирующих правила ее оснащения и эксплуатации [11–12]. На каждой современной АЗС предусмотрен комплекс технических решений и выполняются мероприятия, направленные на минимизацию возникновения аварий и аварийных ситуаций. Для персонала автозаправочных станций создаются безопасные условия труда, отлажен процесс обучения безопасным методам и приемам выполнения работ, организован постоянный контроль за состоянием условий и охраны труда на рабочих местах, а также контроль за соблюдением работниками АЗС требований по охране труда, пожарной и промышленной безопасности [13].

Однако пользователи автозаправочных станций не проходят специальной подготовки и обучения основам безопасной эксплуатации АЗС. Это не предусмотрено программой обучения водителей в автошколах. В такой ситуации приходится действовать интуитивно, идентифицируя общие для всех правила путем наблюдения и повторения действий других пользователей.

Анализ поведения посетителей АЗС «Белоруснефть» показал, что не все водители умеют правильно заправлять автомобиль. При этом практически все автовладельцы делают это регулярно, не задумываясь о том, как часто нарушают правила безопасности на АЗС. Начинающие водители зачастую выбирают неверную сторону подъезда к топливораздаточному крану; некоторые пытаются тянуть шланг через крышу автомобиля, поскольку люк бензобака в машине пользователя расположен с обратной стороны; несмотря на одностороннее движение, объезжают топливораздаточную колонку (ТРК), и автомобиль оказывается против движения; не обращают внимание на знаки безопасности и специальные наклейки с информацией о том, что автомобиль нужно подавать со стороны расположения лючка бензобака. Даже опытные автомобилисты совершают необдуманные поступки: закуривают сигарету возле открытого бензобака, тянут со значительным усилием топливораздаточный шланг, забывают пистолет в горловине бензобака, нарушают установленный на АЗС режим движения.

Следует отметить, что правила безопасного поведения для пользователей на АЗС существуют и прописаны в специальных памятках, на информационных табло и знаках, установленных на территории АЗС или непосредственно на ТРК. Пример таких обозначений приведен на рисунке 1.



Рисунок 1. – Информационные наклейки на оборудовании АЗС

К сожалению, в большинстве случаев пользователи практически не обращают на них внимание, несмотря на то, что это не просто предупреждения, а меры безопасности, основные пункты которых прописаны в правилах технической эксплуатации АЗС, пожарной и промышленной безопасности, дорожного движения и другими нормативными документами, регламентирующими требования безопасности при эксплуатации АЗС.

Рассмотрим основные факторы повышенного уровня риска для жизни и здоровья пользователей на автозаправочных станциях, выявленные при анализе поведения посетителей сети АЗС «Белоруснефть».

1. Превышение установленной скорости.

Скоростное ограничение на территории АЗС оправдано риском наезда на людей и связано с правилами пожарной безопасности. Не единичны случаи гибели людей под колесами на АЗС, существенно нанесение ущерба имуществу собственника АЗС (рисунок 2), а столкновение может спровоцировать возникновение искры, что повышает риск возгорания топлив.



Рисунок 2. – Результат несоблюдения скоростного ограничения на АЗС

2. Несоблюдение дистанции между транспортным средством, стоящим под заправкой, и следующим за ним (не менее 3 м), а также между последующими, находящимися в очереди (не менее 1 м).

Не соблюдая дистанцию, водители подвергают опасности не только себя, но и окружающих. На рисунке 3 показано, как безответственно водители устанавливают свои автомобили для заправки, исключая шанс совершения быстрого маневра в случае чрезвычайной ситуации.



Рисунок 3. – Несоблюдение дистанции между транспортными средствами на АЗС

3. Создание помех для выезда транспортных средств с территории АЗС.

Движение по территории АЗС одностороннее. Обязательным требованием эксплуатации АЗС является наличие при въезде схемы движения с указанием направления, однако некоторые водители подъезжают к ТРК задним ходом либо заезжают на территорию через выезд. Лишние маневры автомобилей, которые не предусмотрены имеющейся разметкой и организацией движения, неизменно увеличивают опасность дорожно-транспортных происшествий. Действия подобного рода нарушают установленный порядок движения по территории АЗС, что приводит к сложности маневрирования, заторам и аварийно-опасным ситуациям. На рисунке 4 приведены схема движения с четким указанием разрешенного направления движения и пример нарушения данного требования.



Рисунок 4. – Несоблюдение порядка движения по территории АЗС

4. Подъезд к ТРК осуществляется не со стороны топливного бака.

Заливные горловины у всех автомобилей расположены по-разному, и может возникнуть ситуация, при которой машины с люком в правом крыле формируют значительную очередь. При этом рядом стоящая ТРК для машин с люком слева будет свободна. По этой причине появляется соблазн нарушить правила заправки. Для заправки автомобиля, установленного таким способом (рисунок 5), водители тянут заправочный шланг и пускают его над крышей, либо «опоясывают» автомобиль. Как результатом – повреждение и износ оборудования ТРК. Более того, разрыв шланга влечет за собой разлив топлива и провоцирует пожароопасную ситуацию.



Рисунок 5. – Заправка не со стороны топливного бака автомобиля

5. Курение и применение открытого огня.

Пары бензина могут воспламениться от любой искры, а открытый источник огня на АЗС (зажигалка, спичка) может привести к пожару и взрыву. Правилами запрещено и курение в салоне автомобиля во время нахождения на территории АЗС.

6. Использование под заправку полимерной либо стеклянной емкости, не предназначенной для перевозки топлива (рисунок 6).

Разрешение отпускать светлые нефтепродукты только в металлическую либо полимерную тару с антистатическими свойствами объясняется тем, что полимерные материалы способны накапливать статический заряд, являющийся источником зажигания паров нефтепродуктов. Не проводящая ток одежда пользователей АЗС также может привести к накоплению зарядов статического электричества, во избежание этого рекомендуется не дотрагиваться до металлических деталей транспортного средства при заправке. Также уговоры некоторых водителей заправить транспортное средство во время грозы не раз приводили к аварийным ситуациям.

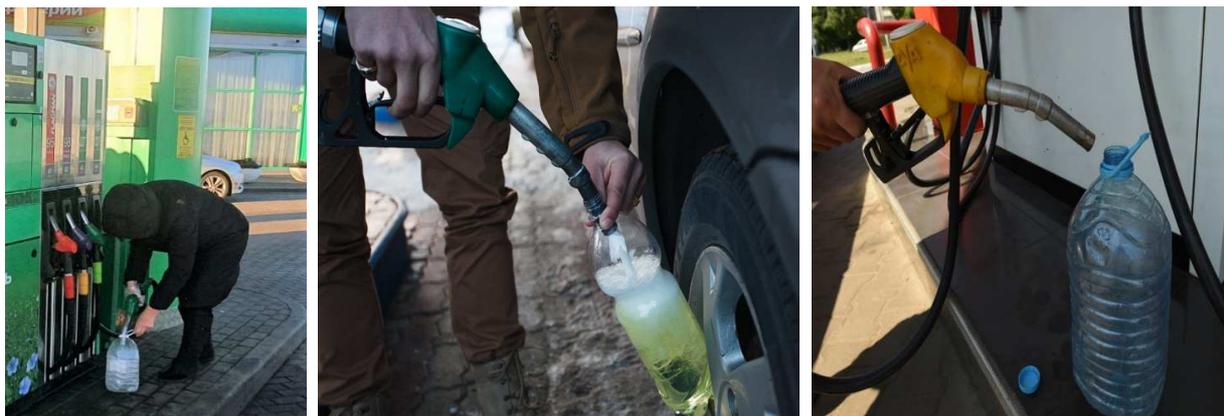


Рисунок 6. – Заправка в полимерную тару

7. Заправка транспортного средства с работающим двигателем.

Многие водители пренебрегают правилом производить заправку при заглушенном двигателе. При этом для возгорания достаточно одной искры, а при работающем двигателе увеличивается риск ее случайного появления. Наиболее высок риск воспламенения при незаглушенном двигателе автомобилей и машин, у которых удален катализатор или установлен прямоточный глушитель.

8. Забывчивость клиента после заправки автомобиля установить топливораздаточный кран в ТРК.

Невнимательность, спешка могут привести к инциденту, итогом которого являются повреждение оборудования АЗС и личного автомобиля. В последние годы регистрируется множество аварийных ситуаций на АЗС, обусловленных тем, что пользователи забывают достать топливозаправочный пистолет из горловины бензобака, например, на 60 АЗС РУП «Белоруснефть-Минскавтозаправка» по этой причине ежегодно фиксируется около 650 поломок оборудования. Технологическое оборудование АЗС застраховано, а ущерб через страховую компанию компенсирует виновник ДТП. На рисунке 7 приведены примеры последствий забывчивости пользователей АЗС.



Рисунок 7. – ДТП, связанные с забывчивостью установить топливораздаточный кран в ТРК

9. Ремонт автомобиля на АЗС.

Любые манипуляции с автомобилем могут стать причиной образования искры при трении и заряда статического электричества. Неисправная машина сама по себе может представлять опасность, а также явиться причиной возможного блокирования путей эвакуации.

10. Оставление без присмотра заправочного пистолета в горловине бака с зафиксированным рычагом.

Считается, что такой способ экономит время, потому как топливо начинает поступать в бак сразу после того, как оператор на кассе дает соответствующую команду. Однако, если пистолет вставлен в горловину неплотно или топливо подается под сильным давлением, шланг может выскочить из бака. Последствия – пролитое топливо, залитый автомобиль и опасность возгорания.

11. Использование мобильного телефона при заправке транспортного средства на АЗС.

Как показывает ряд научных экспериментов, использование данного устройства связи также может стать причиной воспламенения топлив [1–5].

**Заключение.** Таким образом, безопасная эксплуатация АЗС в настоящее время определяется не только неукоснительным соблюдением персоналом (сотрудниками) требований безопасной эксплуатации АЗС, охраны труда, пожарной и промышленной безопасности, дорожного движения, своевременностью обнаружения неисправностей в эксплуатационный период, но и с адекватным поведением пользователей АЗС. Для предупреждения возможных неисправностей в работе оборудования и предотвращения аварийных ситуаций на АЗС требуется разработка курса специальной подготовки и обучения основным составляющим безопасной эксплуатации автозаправочных станций пользователей (посетителей), который может быть включен в программу обучения водителей в автошколах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пикалов, А.В. Общие вопросы безопасности эксплуатации АЗС на автотранспортных предприятиях агропромышленного комплекса / А.В. Пикалов, Н.В. Петренко, И.В. Орищенко // Автотранспортное предприятие. – 2016. – № 4. – С. 41–43.
2. Маринин, С.Ю. Повышение уровня безопасности АЗС на основе анализа риска / С.Ю. Маринин, И.В. Кондратенко // Охрана труда и техника безопасности на промышленных предприятиях. – 2018. – № 5. – С. 73–77.
3. Современные технологии для повышения безопасности при эксплуатации автозаправочных станций / И.Р. Киреев [и др.] // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2017. – № 3-3. – С. 61–65.
4. Энциклопедия промышленной безопасности и охраны труда : учеб. пособие / Р.Н. Бахтизин [и др.]. – Уфа : УГНТУ, 2016. – 720 с.
5. Оценка техногенной безопасности резервуаров автозаправочных станций / Н.А. Мороз [и др.] // Вестн. Моск. гос. агроинженер. ун-та им. В.П. Горячкина. – 2009. – № 4 (35). – С. 56–57.
6. Серебренников, Д.С. Применимость нормативных документов по пожарной безопасности в отношении автозаправочных станций и складов нефти и нефтепродуктов / Д.С. Серебренников, Р.Р. Худолей / Пожарная безопасность. – 2014. – № 1. – С. 106–108.
7. Красногорская, Н.Н. Разработка алгоритма выбора мероприятий для повышения безопасности интегрированной автозаправочной станции / Н.Н. Красногорская, В.В. Ахмеров // В мире научных открытий. – 2015. – № 6-1 (66). – С. 476–487.
8. Красногорская, Н.Н. Обеспечение безопасности эксплуатации автозаправочной станции с мультипродуктовыми топливораздаточными колонками / Н.Н. Красногорская, А.В. Солодовников, В.В. Ахмеров // Нефтегазопереработка–2015 : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Уфа, 20 мая 2015 г. / ГУП «Институт нефтехимпереработки РБ». – 2015. – С. 264–265.
9. Седельников, А.А. Особенности обеспечения пожарной безопасности автозаправочных станций / А.А. Седельников, К.А. Смотровин // Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России. – 2016. – № 5. – С. 157–159.
10. Алиев, А.М. Несоблюдение требований промышленной безопасности на АЗС: причины и последствия / А.М. Алиев // Инновации в строительстве и промышленности. – 2016. – № 1 (3). – С. 6.
11. Эксплуатация автозаправочных станций : сб. норматив. правовых актов / сост. В.И. Грушевич. – Минск : ЦОТЖ, 2004. – 135 с.
12. Об утверждении специфических требований : постановление Совмина // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2019. – 5/47385.
13. Проблемы адаптации персонала белорусских предприятий нефтепродуктообеспечения / И.Н. Кузьменок / Нефть и газ: технологии и инновации : материалы Нац. науч.-практ. конф. : в 3 т. / отв. редактор Н.В. Гумерова. – 2020. – Т. 3. – С. 202–204.

Поступила 09.12.2020

## SAFETY PROBLEMS WHEN HANDLING PETROLEUM PRODUCTS AT GAS STATIONS

I. KUZMENOK, Yu. BULAUKA

*The article considers relevant issues related to safety when handling petroleum products at gas stations using the example of «Belorusneft» gas stations, which are the final link in the oil product supply system of the Republic of Belarus, and which (in addition to refueling) engage in sales of various vehicle accessories, maintenance, and washing. Management of «Belorusneft» gas stations personnel security has been analyzed. Risk factors for the life and health of users in the operation of gas stations are given. Certainly, the safety of operating modes at a gas station is directly related not only to the timely detection of faults in the operational period but also to the adequate behavior of the gas station users. It has been found that a significant impact on the safe operation of gas stations is often exerted by the human factor, due to the lack of special training of users in the main components of the safe operation of gas stations.*

**Keywords:** gasoline station, factor, risk, explosion and fire hazard.

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Мисун А.Л.</i> Прогнозирование безопасного использования с.-х. машин в растениеводстве по их показателю приспособленности к выполнению технологических регулировок .....	2
<i>Алифанов А.В., Малеронок В.В., Богданович И.А., Лях А.А., Милюкова А.М., Толкачева О.А.</i> Исследование влияния режимов магнитно-импульсной обработки на температуру и структурные преобразования в поверхностных слоях образцов из быстрорежущей стали .....	11
<i>Абраменко С.Н., Анисимов В.С., Корба К.В.</i> Программно-аппаратный комплекс для измерения, регистрации и последующей оцифровки процессов, протекающих при высокоскоростной механической обработке .....	15

### ТРАНСПОРТ

<i>Скирковский С.В., Невзорова А.Б.</i> Построение иерархической системы индикаторов для комплексной оценки аварийных ситуаций .....	21
<i>Иванов В.П.</i> Композиционные центры в компоновках производственных корпусов автотранспортных предприятий .....	28
<i>Веремей Г.А.</i> Обеспечение точности при восстановлении седел клапанов в авторемонтном производстве .....	33
<i>Белоцерковский М.А., Дудан А.В., Яловик А.П.</i> Восстановление и испытания штоков силовых гидроцилиндров .....	42
<i>Кострицкий В.В., Павченко А.В.</i> Диагностирование дизельных топливных форсунок с пьезоэлектрическим приводом без снятия с двигателя .....	49

### ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

<i>Мисун В.Л.</i> Улучшение условий и повышение безопасности труда при механизированном контактном внесении пестицидов на растения .....	55
<i>Самусевич В.Н., Булавка Ю.А.</i> Выбор экспертной группы для оценки профессионального риска .....	61
<i>Майорова Е.И., Антух К.П., Уткин А.Г., Бурая И.В., Бакунин В.Н., Ермак А.А.</i> Оценка диспергирующих свойств сукцинимидных присадок к смазочным маслам .....	67
<i>Ленчиков В.А., Добровольский Д.А., Уткин А.Г., Бурая И.В., Бакунин В.Н., Ермак А.А.</i> Влияние карбоновых кислот на фильтруемость и показатели качества синтетического низкощелочного сульфоната кальция (моюще-диспергирующей присадки к моторным маслам) .....	73
<i>Гришин П.Ф., Ермак А.А.</i> Окислительная стабильность гидрокрекинговых базовых масел и способы ее повышения .....	80
<i>Кузьменок И.Н., Булавка Ю.А.</i> Проблемы обеспечения безопасности при обращении с нефтепродуктами на автозаправочных станциях .....	86