

## Статистические исследования комплекса систем централизованного сопровождения функционирования синтетических СОЖ на Заводе Двигателей

Е.М. Булыжев<sup>1a</sup>, Ю.Б. Алякин<sup>2b</sup>, В.Н. Клячкин<sup>1c</sup>, В.Г. Тронин<sup>1d</sup>

<sup>1</sup> Ульяновский государственный технический университет, ул. Северный Венец, 32, Ульяновск, Россия

<sup>2</sup> Ульяновский государственный университет, ул. Льва Толстого, 42, Ульяновск, Россия

<sup>a</sup> eugbul1946@gmail.com, <sup>b</sup> kontro73@yandex.ru, <sup>c</sup> v\_kl@mail.ru, <sup>d</sup> vadimgt77@gmail.com

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0009-0008-7436-9800>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0009-0007-2093-0730>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2581-6108>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1148-1674>.

Поступила 15.09.2025, принята 18.11.2025

*Совершенствование технологий применения СОЖ при механообработке происходило по двум направлениям: улучшение физико-химических и технологических свойств СОЖ и улучшение системных технологий централизованного сопровождения функционирования СОЖ. Вследствие высокой способности противостоять негативным внешним физико-химическим, механическим и тепловым воздействиям синтетических СОЖ ожидали многократного увеличения «стойкости». Однако наблюдаемые эффекты продления периода времени между заменами синтетических СОЖ оказались значительно меньше ожидаемых. Многократное снижение стойкости СОЖ обусловлено тем, что коррекция объёма и состава СОЖ производилась не чаще двух раз в месяц. При исследованиях выявлены закономерности формирования и накопления в синтетической жидкости изменений, являющихся основной причиной сброса СОЖ на разложение. Исследования функционирования синтетических СОЖ проводили в течение одного года в комплексе из 27 установок централизованного применения. В ходе исследования был сформирован и апробирован инструментарий (математический, статистический и т. п.) анализа информации, получаемой при контроле состава, свойств и расхода синтетической СОЖ при эксплуатации. Выявлено, что потери СОЖ соответствуют её деградации, ухудшению условий механообработки и снижению эффективности процесса, а также системному увеличению всех статей себестоимости, включая затраты на металлорежущий инструмент, амортизацию и другие.*

**Ключевые слова:** синтетическая смазочно-охлаждающая жидкость; замена; эксплуатация; часовой цикл оборота; срок эксплуатации между заменами; распределённые потери СОЖ; предотвращение потерь при замене; эффективность СОЖ; статьи себестоимости; затраты на режущий инструмент.

## Statistical research of a complex of centralized systems for monitoring the operation of cutting fluids at the Engine Plant

E.M. Bulyzhev<sup>1a</sup>, Yu.B. Alyakin<sup>2b</sup>, V.N. Klyachkin<sup>1c</sup>, V.G. Tronin<sup>1d</sup>

<sup>1</sup> Ulyanovsk State Technical University; 32, Severny Venets St., Ulyanovsk, Russia

<sup>2</sup> Ulyanovsk State University; 42 Lev Tolstoy St., Ulyanovsk, Russia

<sup>a</sup> eugbul1946@gmail.com, <sup>b</sup> kontro73@yandex.ru, <sup>c</sup> v\_kl@mail.ru, <sup>d</sup> vadimgt77@gmail.com

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0009-0008-7436-9800>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0009-0007-2093-0730>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2581-6108>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1148-1674>.

Received 15.09.2025, accepted 18.11.2025

*Improvements in the use of cutting fluids in machining have been pursued in two areas: improving the physicochemical and technological properties of cutting fluids and enhancing systems technologies for centralized control of cutting fluid operation. Due to the high resistance of synthetic cutting fluids to adverse external physicochemical, mechanical, and thermal influences, a manifold increase in their service life was expected. However, the observed effects of extending the period between synthetic cutting fluid changes were significantly less than expected. The significant decrease in cutting fluid service life is due to the fact that adjustments to the volume and composition of the cutting fluid were made no more than twice a month. Research has revealed patterns in the formation and accumulation of changes in the synthetic fluid, which are the main cause of cutting fluid decomposition. Research into the performance of synthetic cutting fluids was conducted over the course of one year in a complex of 27 centralized installations. During the study, a set of tools (mathematical, statistical, etc.) has been developed and tested for analyzing data obtained from monitoring the composition, properties, and consumption of synthetic cutting fluid during operation. It has been found that cutting fluid losses correspond to their degradation, deterioration of machining conditions, and a decrease in process efficiency, as well as a systemic increase in all cost items, including the cost of cutting tools, depreciation, and other expenses.*

**Keywords:** synthetic cutting fluid; replacement; operation; hourly turnover cycle; service life between replacements; distributed cutting fluid losses; loss prevention during replacement; cutting fluid efficiency; cost items; cutting tool costs.

**Введение.** Смазочно-охлаждающие жидкости, в том числе и синтетические, являются неотъемлемой составляющей процесса металлообработки [1–8], своеобразным «рабочим телом», без которого производственный процесс металлообработки невыполним. СОЖ – один из основных видов ресурсов. Доля расходов на синтетические СОЖ составляет до 10–17 % прямых затрат. В некоторых источниках приводится «не совсем» точный перевод терминов-аналогов аббревиатуры СОЖ, прочно установившейся в технической литературе. Варианты такого перевода: «режущая» жидкость, «шлифовальная» жидкости и т. п. СОЖ не режет и не шлифует поверхность заготовок деталей (если в составе нет специальной дисперсной присадки). Но эффекты, получаемые с помощью СОЖ, весьма значимы и не могут быть достигнутыми без неё. М.В. Обшивалкин и многие другие исследователи считают, что значимость прямых затрат на СОЖ не так уж велика по сравнению с увеличением затрат на режущий инструмент. Затраты на режущий инструмент при некачественной СОЖ могут увеличиваться в 2–3 раза [7].

В нашей стране развитие применения СОЖ при металлообработке осуществлялось по двум направлениям:

- совершенствование существующих и разработка новых составов концентратов водоземulsionных и водоразбавляемых (полусинтетических) СОЖ;
- совершенствование технологий системного применения СОЖ (технология «ВИТА»), причём значимым ограничением являлась её способность к разложению после отработки [1–5].

Поэтому специализированные предприятия неохотно шли на решение задачи разработки составов синтетических СОЖ из-за их несклонности к разложению и последующей нейтрализации водных стоков с помощью существующих методов. А без гарантий этого они не могли выпускать синтетические СОЖ, до тех пор, пока не обеспечивали их выпуск надёжной технологией разложения. **Такая технология не существовала и не существует в нашей стране и по сию пору.** Единственный способ, используемый для обеспечения относительной безвредности водных стоков остаётся многократное разбавление до «нормативов».

Как ни странно, зарубежные источники, освещающие исследования синтетических СОЖ, в основном, рассказывают о появлении всё более стойких синтетических СОЖ [7–20]. Появились в научно-технической литературе сведения о положительных технологических результатах, достигаемых при введении в состав СОЖ графенов в виде дисперсных частиц, пластин и т. д. Очевидно их будут насыщать средствами, препятствующими разрушению при эксплуатации; хотя этот вопрос исследователи упорно обходят [6–22]. Однако возможно в будущем в практике металлообработки появятся технологии, обеспечивающие разрушение самых стойких синтетических СОЖ.

Настоящие исследования могут стать предтечей разработки новых технологий централизованного сопровождения функционирования (ЦСФ) СОЖ, в том числе, синтетических, относительно экономичных и достаточно эффективных, аналогичных системной технологии «ВИТА», разработанной в аспекте бережливого производства.

В состав упомянутого ЖЦ входят:

- приготовление водных СОЖ на основе концентратов;
- циркуляция в ЦСФ и технологическом оборудовании поточной линии;
- коррекция состава и компенсация потерь в процессе эксплуатации, восстановление качества СОЖ и очистка от механических примесей и инородных масел;
- периодическое сбрасывание на разложение в специализированных установках;
- нейтрализация водных стоков, образующихся при разложении;
- утилизация, выделенных при разложении синтетических СОЖ, субстанций.

Нежелательные явления при эксплуатации синтетической СОЖ представлены в карте нежелательных явлений (табл. 1) [6]. Анализ табл. 1 показывает многогранность негативных процессов, протекающих, при применении СОЖ, приводящих в значительному ухудшению качества обработки, снижению скорости подачи инструмента и увеличению его потерь.

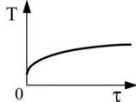
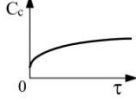
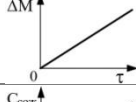
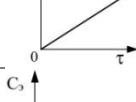
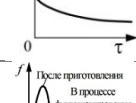
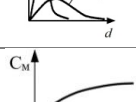
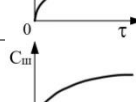

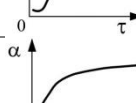
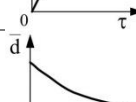
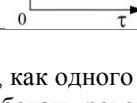
Авторы сформулировали гипотезу о возможности создания системной технологии ЦСФ синтетических СОЖ. По существу, создание такой технологии уменьшит злободневность проблемы отсутствия технологии разложения синтетических СОЖ за счёт многократного снижения потребности в заменах с образованием стоков СОЖ и направлением их на разложение и нейтрализацию. Кроме того, излишние потери СОЖ свидетельствуют о нестабильности (нестационарности) процесса механообработки и соответствуют возрастанию себестоимости особенно по статье затрат на режущий инструмент.

В связи с вышеизложенным авторами были проведены впервые исследования в рамках НИР (Завод двигателей, ПАО «КАМАЗ» и ООО «Технохим» г. Ульяновск). Исследования проводили с использованием средних величин, систематизации, группирования, построения таблиц, графиков, диаграмм.

В рамках исследований проводили анализ контента статистических данных, полученных на существующем комплексе ЦСФ.

Уникальность данного комплекса заключается в одновременности и параллельности работ всех, входящих в его состав ЦСФ. При этом авторы опирались на кластерный подход, который был нацелен на выявление сходства ЦСФ в группах и технологических ситуаций (ТС), сопровождающих их применение

Таблица 1. Карта нежелательных явлений в процессе эксплуатации синтетической СОЖ

№ п/п	Процессы и факторы, ухудшающие функциональные свойства СОЖ	Следствия	Характер изменения параметров процесса *)
1	Теплообмен в зоне механической обработки, сжатие в насосах	Нагрев СОЖ	
2	Испарение водной фазы в зоне механической обработки при разбрызгивании, на открытых поверхностях	Накопление солей жесткости в СОЖ. Потеря объема СОЖ и концентрации	
3	Пиролиз и гидролиз в зоне механической обработки	Деструкция композиции СОЖ	
4	Унос со стружкой и заготовкой, угар и разбрызгивание в зоне резания, утечки, расслоение	Потеря СОЖ	
		Изменение концентрации СОЖ	
5	Потеря ПАВ со стружкой, при разбрызгивании, биопоражение	Деструкция состава СОЖ	
6	Утечки с оборудования, поверхности заготовок	Накопление инородного масла	
7	Смыв стружки из зоны механической обработки	Накопление тонких механических примесей (графита), возникающих при трении элементов чугуновой стружки	
8	Бактериальное поражение	Развитие микрофлоры	
9	Воздействие энергетических полей (магнитного)	Активация СОЖ	
10	Недостаточная эффективность очистки	Накопление тонких фракций механических частиц	

**Цель исследований.** Цель проведённых исследований заключалась в выявлении закономерностей формирования и накопления негативных изменений («усталости») в синтетических СОЖ, которые вызывают преждевременный её сброс на разложение. В основу исследований был положен принцип «чёрного ящика». Авторы анализировали эксплуатационную ситуацию по реакции в виде потерь СОЖ на разложения безусловно бесполезных с экономической и с экологической точек зрения, а также в виде неизбежных распределённых «условно полезных» потерь в зоне металлообработки и в инфраструктуре ЦСФ.

Объект исследования был выбран на основе следующих обстоятельств:

а) комплекс существовал в течение длительного времени и существует независимо от наблюдателя;

б) познание комплекса во всём многообразии ЦСФ позволяет обеспечить его совершенствование в части

значимого снижения потерь СОЖ, как одного из основных видов ресурса, а также разработать рекомендации по модернизации и проектированию новой системы управления комплексом в дальнейшем;

в) исследование нацеливалось на комплексное изучение сторон, свойств и связей объекта в парадигме используемого системного подхода к процессу эксплуатации комплекса ЦСФ при металлообработке в условиях их широкого варьирования;

г) исследование проводилось конкретно в определённой технологической ситуации, при этом учитывали особенности объекта и специфические условия его существования.

Организованный анализ результатов наблюдений на комплексе ЦСФ показал, что они соответствовали требованиям:

– преднамеренности и целенаправленности в связи с функционированием группы сотрудников, являющихся

инженерами-наладчиками ЦСФ, обеспечивающими достигаемую в ручном управлении эффективность;

– плановность всякой с проведением по графику, в соответствии с возможностями группы управления и сопровождения ЦСФ;

– систематичность, поскольку результаты наблюдений регулярно обсуждались на совещаниях разного уровня, включая совещание по проводимому хозяйственному договору.

При описании результатов исследований были обеспечены максимальная полнота и объективность для получения достоверной и адекватной картины объекта и отображения процесса.

При наблюдении выполняли две функции: обеспечение эвристической информации о ЦСФ [3–5] и проверку выдвигаемых гипотез или теоретических посылок. При разрешении проблемной ситуации уменьшения срока эксплуатации возникла научная проблема обеспечения многократного снижения потерь СиПС СОЖ в ЦСФ посредством синергии свойств самой СОЖ и воздействия факторов, определяющих потенциал ЦСФ по защите СОЖ от негативного «давления», со стороны, зоны резания и самой инфраструктуры ЦСФ.

Предмет проводимого исследования – потери синтетических СОЖ при функционировании и потери СОЖ, вследствие учащения замен отработавшей жидкости в контексте бережливого производства.

**Методика исследования.** Задачи исследования: выявление характера варьирования потерь объёма, концентрации СОЖ, величин pH и биопоражения при функционировании жидкости, а также влияние качественных показателей ТС на основные показатели эксплуатационной эффективности.

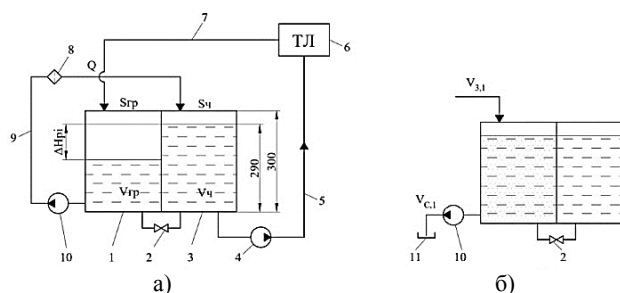
При проведении исследований проводилась систематизация информации.

В дальнейшем подтвердилось, что при исследовании потерь СОЖ в ЦСФ на основе систематизации и формирования цифровых двойников ЦСФ возможно упростить и сделать более прозрачной процедуру анализа технологических ситуаций в комплексе ЦСФ.

При исследованиях производили оценку периода времени между заменами СОЖ  $T_3$ , ч, как необходимого для замены СОЖ и предотвращения катастрофы, выражающейся в необходимости аварийного сброса, возникнет в связи с невыполнением технологических требований со стороны производства. Оценку момента сброса устанавливали при контроле концентрации СОЖ, величины pH, индекса биопоражения  $I_{БП}$ , загрязнения механической примесью и инородным маслом и т. д.

При исследованиях производили оценку неизбежных распределённых в данной производственной ситуации скорости потерь  $v'$  (расхода на процесс обработки) СОЖ для данной ЦСФ, числа замен СОЖ в год  $n_3$ , объёма утраченной СОЖ при её обороте  $\Delta V$  за время  $\Delta T$ . Оценка величины  $\Delta V$ , характеризующей значение потери объёма, проводилась посредством замера глубины уровня СОЖ в ёмкости от её верхнего уровня в ночное время или при спокойном состоянии зеркала СОЖ в обеденный перерыв.

На рис. 1 показана упрощенная гидравлическая схема ЦСФ, работа которой понятна из подрисовочной надписи. Раз в одну–две недели производили компенсацию потерь (коррекцию объёма) СОЖ в ёмкости ЦСФ.

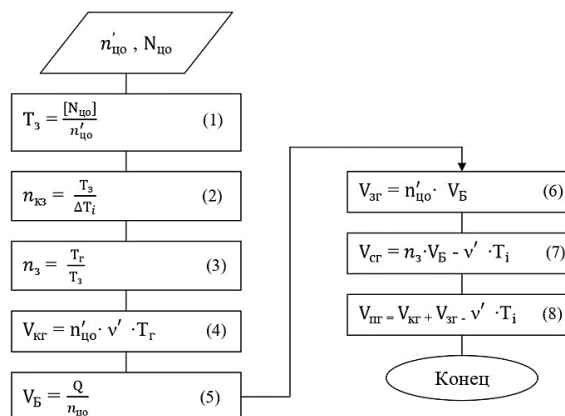


**Рис. 1.** Упрощенная гидравлическая схема ЦСФ: 1, 3 – грязевой и чистовой отсеки ёмкости; 2 – задвижка; 4, 10 – насос центробежный; 5, 9 – трубопровод; 6 – технологическая линия; 7 – самоточные технологические лотки; 8 – установка фильтрации; 11 – промежуточная ёмкость комплекса ЦСФ

Уровень СОЖ в резервуаре ЦСФ замеряли с помощью мерной линейки 1 раз в сутки (утром), величины параметров: концентрация СОЖ,  $\alpha$ , pH и  $I_{БП}$  оценивали с помощью традиционных методик и существующих широко распространённых приборов: рефрактометр, цифровой pH-метр, специальные индикаторы измерения  $I_{БП}$ . При обработке использовался матаппарат, представленный в работе [3–5].

На рис. 2 представлена блок-схема алгоритма расчётов цифровых показателей ЦСФ, становящихся основой цифрового двойника ТС и ЦСФ в контексте оценки эксплуатационной эффективности СОЖ.

Показатели  $v'$ ,  $n_3$ ,  $T_3$ ,  $N_{ЦЗ}$  впоследствии были приняты в качестве индикаторов распределённых неизбежных потерь СОЖ при её замене.



**Рис. 2.** Блок-схема алгоритма определения конструктивно-технологических показателей ЦСФ

На рис. 3 показана расчётная схема заглубления уровня СОЖ в ёмкости ЦСФ, выявлены показатели  $\Delta V$  и  $v'$  или  $v$  за время  $\Delta T$ , представлена в виде графика циклограмма коррекции СОЖ (рис. 3, в).

Обозначения уровней заглубления, см:

- $H_0$  – верхний край ёмкости – точка отсчёта заглубления уровня, см;
- $H_1$  – уровень заполнения ёмкости, см;
- $H_2$  – уровень, находящейся в ёмкости СОЖ, после суммарной её потери за период безкоррекционной (безкомпенсационной) её эксплуатации, см;
- $H_{3м}$  – уровень СОЖ, возникающий вследствие заполнения ею трубопроводов, станков технологической



линии, лотков стока до момента возврата в ёмкость ЦСФ, см;

–  $H_{3K}$  – уровень заглубления СОЖ в ёмкости перед коррекцией объёма, см;

–  $H_5$  – уровень заглубления СОЖ, обеспечивающий предотвращение попадания воздуха в насос во избежание кавитации, см;

–  $H_6$  – заглубление дна ёмкости, см;

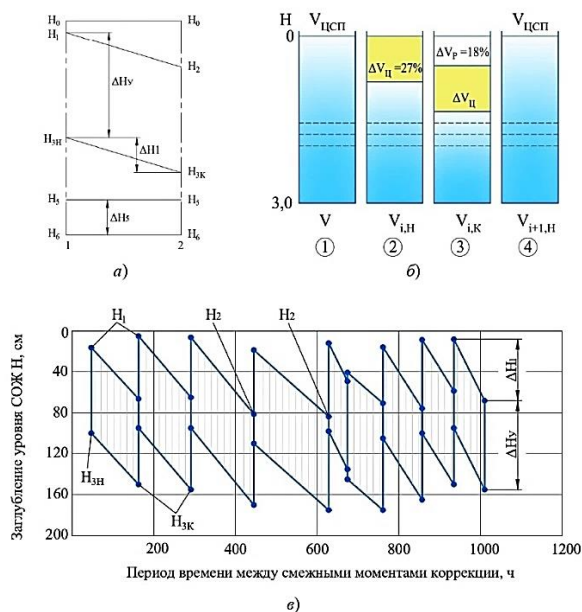
–  $\Delta H_2$  – перепады заглублений, возникающие вследствие потерь (энтропии) СОЖ за безкоррекционный период её эксплуатации, см;

–  $\Delta H_5$  – перепад заглубления уровня, позволяющий избежать засасывания насосом воздуха, см;

–  $\Delta H_{Ц}$  – перепад заглубления уровня, возникающий вследствие заполнения инфраструктуры ЦСФ циркулирующей жидкостью.

$$H_{3H} = H_0 - H_1 - \Delta H_{Ц};$$

$$H_{3K} = H_0 - H_1 - \Delta H_2 - \Delta H_3.$$



**Рис. 3.** Схема изменения заглубления уровней и объемов СиПС СОЖ в ёмкости ЦСФ комплекса: а – расчётная схема; б – схема состояний СиПС СОЖ в ёмкости ЦСФ в процессе эксплуатации в момент (замены) «1» и «4», при первоначальной подаче СОЖ в ЦСФ «2» и в конечный момент перед коррекцией объёма «3»; в – временной ряд изменений заглубления уровней

На рис. 4, а представлены временные ряды – графиков значений  $\Delta H(\Delta T)$ , позволяющие преобразовать их в графики  $\Delta V(\Delta T)$  и  $v(\Delta T)$ . Рабочая гипотеза о нестационарности процесса механообработки подтверждается при их анализе, на постоянстве во времени скорости распределённых неизбежных потерь СОЖ. Анализ данной информации показал, что  $v$ , а следовательно, и  $v' \neq v/n_{ц0}$  непостоянны во времени, поскольку непостоянны условия работы производственных линий (простой оборудования, непостоянное на практике время работы оборудования при условном постоянстве, в то же время, расчётного рабочего времени в сутках ( $T_c = 16$  часов) при расчётах).

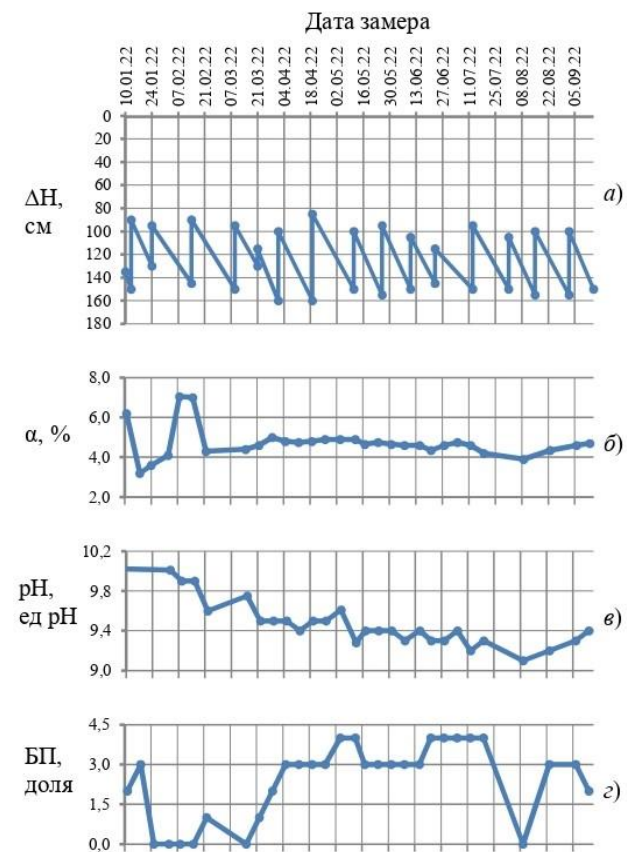
На рис. 4 прослеживается переменный размах варьирования  $\Delta X$ , наряду с участками сравнительно небольших значений наблюдались повышенные значения размаха варьирования.

Параллельно проводились замеры таких показателей и выполнения временных графиков: концентрация  $\alpha$ , рН,  $I_{БП}$  (индекс биопоражения) и зависимости  $\alpha(T)$ ,  $pH(T)$ ,  $I_{БП}(T)$ , показанных на рисунках 4, б–г.

Гипотеза о постоянстве  $v'(n_{ц0})$ ,  $v(T)$  не нашла подтверждения, а поэтому была отвергнута.

Была выдвинута другая гипотеза о зависимости  $v'(n_{ц0})$ ,  $v(T)$ ,  $n_3(v', n_{кз})$  от времени и соответственно от условий эксплуатации (реакция на процессы в «чёрном ящике»).

В дальнейшем подтверждение этой гипотезы привело к пониманию возможности использования  $v'(T)$  и  $v(T)$  в качестве индикаторов, позволяющих оценить, как состояние СОЖ при обороте в зоне обработки, так и интегральное состояние самого работающего технологического оборудования, обслуживаемого с помощью СОЖ, функционирующей в ТС данной ЦСФ.



**Рис. 4.** Временные ряды варьирования для ЦСФ 4: а –  $\Delta H$ ; б –  $\alpha$ ; в – рН; г –  $I_{БП}$

Для учёта вариации ТС её отображали с помощью как количественных, так и качественных показателей. В качестве количественных показателей использовали такие как: производительность  $Q$ ,  $m^3/ч$ ; объём ёмкости  $V_B$ ,  $m^3$ ;  $n'_{ц0}$ ,  $1/об$ ;  $T_3$ , ч;  $K_{n_{цз}}$ ,  $[N_{цз}]$ , так и качественные: состав (тип) СОЖ, материал заготовок (алюминиевый сплав, сталь и чугун), а также вид обработки («лезвий-

ная» и шлифование). Качественные показатели группировались в группы с одинаковым набором качественных показателей. Это позволяло в ряде случаев отделить и оценить раздельное влияние количественных и качественных показателей на показатели бережливости производства и оптимизации процесса.

**Результаты работы и их обсуждение.** В табл. 2 (семь групп), рис. 5 и табл. 3 (шесть групп) показаны качественные и количественные показатели, характеризующие ТС и ЦСФ, обеспечивающие сохранность СиПС СОЖ в процессе оборота в сопряжении с № ЦСФ и с вариантом ТС, причём по группам, без изменения в составе группы качественных показателей, с ранжированием по  $n_3$  внутри группы и для групп по средним арифметическим и средневзвешенным значениям  $\bar{n}_3$ .

Таблица 2. Технологические условия эксплуатационные

№ 1	Вид обработки	Технологическая ситуация									
2	Материал заготовки	Л					Ч				
3	Состав СОЖ	АЛ					См				
4	Все операции лезвийной и абразивной обработки согласно технологическим на автоматических линиях	205					205				
5	Производительность Q, м³/ч	180	720	1080	720	720	720	720	1080	720	720
6	Объем бака V <sub>0</sub> , м³	34	114	165	130	130	130	150	150	180	167
7	Часовой оборот СОЖ n <sub>0</sub> , раз	5,29	6,32	6,55	5,54	5,54	5,54	4,80	4,80	6,00	4,31
8	Концентрация α	0,09	0,06	0,08	0,085	0,07	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
9	Число замен, n <sub>з</sub>	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2
10	№ ЦСФ	24	73	25	23	76	3	55	58	4	2

№	Технологическая ситуация													
1	Л					Ш					Л		Ш	
2	Ст													Ч
3	205											46	См	205
4	обработка МСД	обработка МСД и шестерен	обработка колена	обработка шестерен	обработка колена	шиповые МСД и шпунта	шиповые шестерен	шиповые детали	шиповые болтов	шиповые шпунта	шиповые МСД	шиповые колена	шиповые колена	
5	720	720	360	720	360	360	360	180	360	360	360	360	1080	
6	130	150	105	165	95	75	75	38	75	75	75	66	167	
7	5,54	4,80	3,43	4,36	3,79	4,80	4,80	4,74	4,80	4,80	5,45	5,45	6,47	
8	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,06	
9	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	2	2	
10	59	63	67	65	70	13	66	71	61	14	10	69	72	

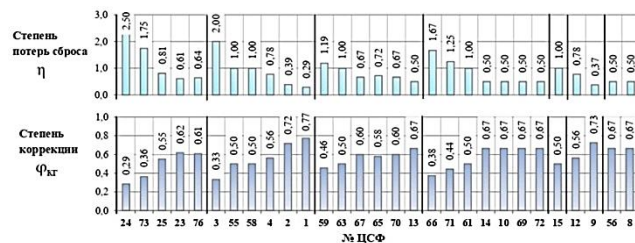


Рис. 5. Коэффициент потерь СИПС СОЖ со сбросами и степень объемов распределённых (неизбежных) потерь СИПС СОЖ на комплексе ЦСФ

Все ЦСФ в табл. 3 распределены по группам по величине  $\bar{n}_3$  для группы. Внутри группы все ЦСФ распределены в порядке возрастания (в ряду группы: 1 –  $\bar{n}_3 = 1,13$ ; 2 –  $\bar{n}_3 = 1,35$ ; 3 –  $\bar{n}_3 = 1,48$ ; 4 –  $\bar{n}_3 = 1,6$ ; 5 –  $\bar{n}_3 = 1,9$ ; 6 –  $\bar{n}_3 = 2,07$ ). В первой группе сочетание качественных

показателей: АЛ – алюминиевый сплав; Л – лезвийная обработка; См – смесь СиПС СОЖ. Во второй группе – качественные показатели: Ст – сталь, Л, синтетическая СОЖ 205; СиПС СОЖ. В третьей группе качественные показатели: Л, Ст, синтетические СОЖ. В четвёртой группе: шлифование, Ст и синтетическая СОЖ. В пятой группе: Л, Ч, синтетическая СОЖ. В шестой группе: Ш, Ч, синтетическая СОЖ. В табл. 3 в соответствии с № ЦСФ показатели, характеризующие ТС ЦСФ, в том числе название технологических поточных (автоматических линий).

Влияние качественных показателей на эксплуатационные показатели оказалось варьирующимся в интервале  $K = 1,03–1,67$ , то есть относительно небольшим.

Табл. 3 и рис. 6 позволили разделить влияние качественных показателей и влияние количественных на показатели качества СОЖ, ЦСФ и ТС, что впоследствии может учитываться при проектировании комплексов ЦСФ и индивидуальных систем применения ИСП. Коэффициенты коррекции могут учитываться при разработке технологических рекомендаций при разработке и планировании таблиц распределения СОЖ по ЦСФ.

На рис. 6, а, б, в и г показаны зависимости  $v'(n_3)$ ,  $T_3(n_3)$ , и  $N_{ЦЗ}(n_3)$ , с характерной особенностью падающей нелинейной зависимостью; между ними есть корреляционная взаимосвязь, что необходимо проверить, путём сопоставления рядов  $v'(n_3)$ ,  $T_3(n_3)$ , и  $N_{ЦЗ}(n_3)$  по критерию  $R^2$ .

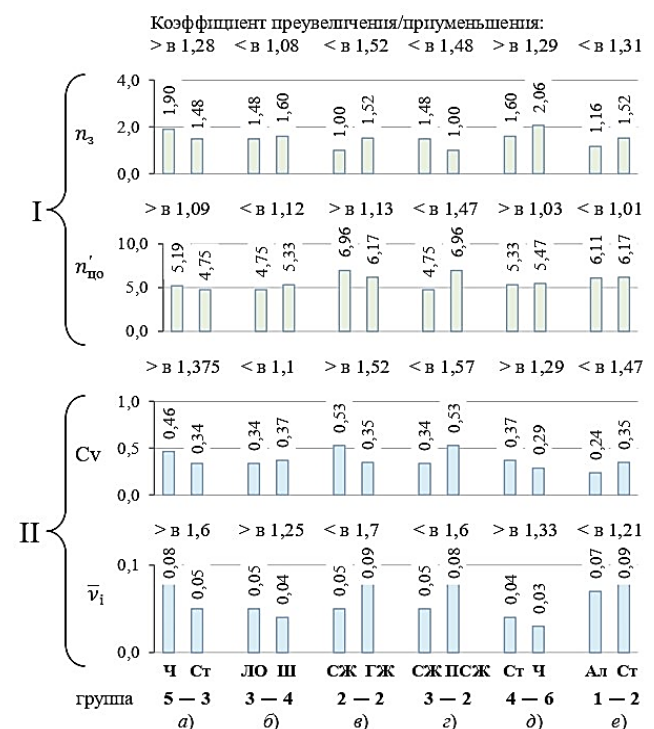


Рис. 6. Сопоставление качественных показателей по группам по соответствию преувеличения/приумножения значения численных показателей:  $n_3$  и  $n'_{цз}$ ,  $CV$  и  $v'$  (по табл. 2) как результатов конечной оценки влияния качественных показателей на числовые количественные показатели

Для выявления взаимосвязей количественных показателей эксплуатационной эффективности расположили

имеющийся цифровой контент табл. 3 со сквозным ранжированием по  $n_3$  по всем ЦСФ. При этом разделили контент на группы по квалитетах:  $n_3 = 0,5-1,0$ ;  $1,0-1,5$ ;  $1,5-2,0$ ;  $2,0-2,5$ ;  $2,5-3,0$ ;  $3,0-3,5$ ;  $3,5-4,0$ .

В квалитет 2,5–3,0 не попала ни одна ЦСФ. Сформировали шесть квалитетов, начиная с первой цифры и менее второй цифры для квалитета. В составе показателей количественной информации были использованы кроме  $n_3$  следующие:  $v'_i$ ,  $n'_{ц0}$ , которые были связаны впоследствии в уравнения. Характерно, что в графах 8–12 при одинаковых значениях  $n_3 = 1,0$ ;  $1,33$ ;  $1,71$ ;  $2,0$  стало возможным выявление взаимосвязи показателей между  $v'$ ,  $n_{ц0}$ ,  $T_3$ ,  $K_{n_{ц3}}$ ,  $[N_{ц3}]$ . Три показателя  $T_3$ ,  $K_{n_{ц3}}$ ,  $[N_{ц3}]$  характеризуют способность ЦСФ поддерживать «стойкость» СОЖ в процессе эксплуатации, а показатели  $v'$  и  $n_{ц0}$  характеризуют «условно» накапливаемую усталость. На рис. 7 представлены по группам зависимости а –  $T_3(n_{ц0})$ , б –  $[N_{ц3}](n_3)$ .

Таблица 3. Основные показатели процесса эксплуатации СиПС СОЖ

№ п/п	Вариант распределения уровней ЦСП по $n_3$	Технологическая ситуация				Ранжированное число замен по факту	Скорость распределенных потерь СОЖ, $\frac{1}{n_{100}}$	Число циклов оборотов в час, $Q/(V'_0 + 0,5 \cdot \Delta V_1)$	Период времени между заменами СОЖ, $t_{100}/n_3$	Отношение числа пика оборота СОЖ к числу замен в год, $n_{100}/n_3$	Ограничение числа пика оборота СОЖ в период времени между заменами СОЖ, $T_3 \cdot n_{100}/n_3$	
		Состав СОЖ	Материал заготовки	Вид обработки	ЦСП №							
$n_3$	$v'_i$	$n_{100}$	$T_3$	$K_{n_{100}}$	$[N_{100}]$							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	1	205/46	АЛ	Л	23	0,70	0,022	6,02	5943	8,60	35791	
2		205/46	АЛ	Л	24	0,92	0,003	5,63	4507	6,10	25360	
3		205/46	АЛ	Л	25	0,98	0,012	6,98	4245	7,12	29620	
4		205/46	АЛ	Л	76	2,00	0,009	5,80	2080	2,90	12057	
среднее						1,15	0,011	6,11	4194	6,18	25707	
5	2	46	Ст	Л	15	1,00	0,011	6,96	4160	6,96	28972	
6		205/46	Ст	Л	9	1,33	0,016	5,95	3121	4,47	18582	
7		205/46	Ст	Л	12	1,71	0,012	6,38	2427	3,72	15481	
среднее						1,35	0,013	6,43	3236	5,05	21012	
8	3	205	Ст	Л	67	1,20	0,014	3,64	3467	3,04	12633	
9		205	Ст	Л	70	1,20	0,013	4,06	3467	3,38	14060	
10		205	Ст	Л	65	1,33	0,011	4,59	3121	3,45	14338	
11		205	Ст	Л	59	1,71	0,009	5,99	2427	3,49	14532	
12		205	Ст	Л	63	1,71	0,012	5,02	2427	2,93	12179	
13		205	Ст	Л	13	1,71	0,010	5,17	2427	3,02	12558	
среднее						1,48	0,011	4,75	2889	3,22	13383	
14	4	205	Ст	Ш	61	0,80	0,007	5,14	5200	6,43	26729	
15		205	Ст	Ш	71	1,00	0,004	5,05	4160	5,05	21011	
16		205	Ст	Ш	66	1,33	0,007	5,14	3121	3,85	16034	
17		205	Ст	Ш	14	1,33	0,007	5,16	3121	3,87	16111	
18		205	Ст	Ш	10	1,71	0,010	5,16	2427	3,01	12516	
19		205	Ст	Ш	69	2,00	0,006	5,86	2080	2,93	12182	
20		205	Ст	Ш	72	3,00	0,006	5,82	1387	1,94	8065	
среднее						1,60	0,007	5,33	3071	3,87	16092	
21	5	205	Ч	Л	1	1,00	0,029	4,59	4160	4,59	19105	
22		205	Ч	Л	2	1,00	0,023	4,65	4160	4,65	19343	
23		205	Ч	Л	55	1,50	0,012	5,16	2773	3,44	14311	
24		205	Ч	Л	58	2,00	0,010	5,13	2080	2,56	10663	
25		205	Ч	Л	4	4,00	0,009	6,40	1040	1,60	6653	
среднее						1,90	0,017	5,19	2843	3,37	14015	
26	6	205	Ч	Ш	56	1,71	0,008	5,13	2427	2,99	12442	
27		205	Ч	Ш	8	2,40	0,005	5,82	1733	2,43	10090	
среднее						2,06	0,006	5,47	2080	2,71	11266	
Σ						42,3	0,295	146,4	83687	108,5	451418	
Среднее						1,57	0,011	5,42	3100	4,02	16719	

Стабилизация объёмов СОЖ (рис. 8), увеличение числа (частоты) коррекции, снижение размаха варьирования потерь обеспечивает снижение числа замен,

т. е. её стабильность, по существу, оказывает позитивное воздействие на весь процесс механообработки, а также на весь производственный процесс предприятия и способствует его оптимизации в числе прочих средств оптимизаций.

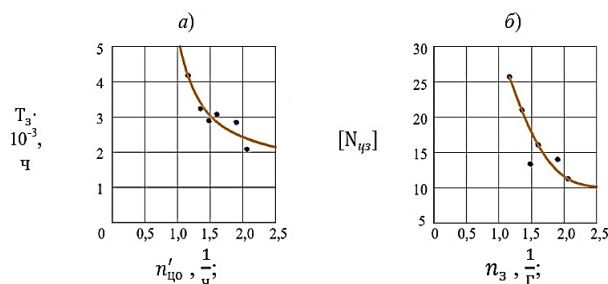


Рис. 7. Взаимосвязь между показателями эксплуатационной эффективности: а –  $T_3(n_3)$ ; б –  $[N_{ц3}](n_3)$  для средних групповых значений

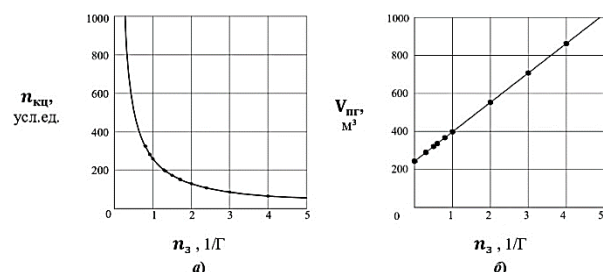


Рис. 8. Зависимость по средним значениям. Зависимость по средним значениям для групп ЦСФ комплекса применения СОЖ: а – зависимость  $n_{кц}(n_3)$ ; б – зависимость  $V_{пр}(n_3)$

## Выводы

1. На основе анализа научно-технической информации о централизованном применении синтетических СОЖ в аспекте бережливого производства и оптимизации производственного процесса были получены:

а) факт многократного снижения заявляемого разработчиками периода времени функционирования синтетической СОЖ между заменами;

б) была разработана и подтверждена гипотеза о возможности кратного увеличения периода времени функционирования;

в) сформулирована проблема, заключающаяся в формировании бережливого отношения к одному из основных ресурсов, определяющих металлообработку – СОЖ, и оптимизации производственного процесса.

2. Разработана и апробирована методика исследований.

3. Разработан способ систематизации статистической информации и сформирован информационный двойник комплекса, который позволил сопоставлять, сравнивать, выявлять закономерности и взаимосвязи основных параметров, характеризующих потери СОЖ.

4. При проведении исследований установлено, что:

а) систематические неизбежные распределённые потери СОЖ, по существу, характеризуют эффективность её применения в процессе металлообработки.

Данные потери характеризуют нормы расхода синтетической СОЖ при технологических условиях цифрового двойника группы ЦСФ. Скорость потери объёма



СОЖ при её обороте через зону обработки в ЦСФ составляет 0,003–0,030 м<sup>3</sup>/1 об (оценивается с помощью скорости потерь СОЖ при обороте в ЦСФ и технологической системе);

б) периодические потери при потере СОЖ (потери которые предотвращаются за счёт технологии и техники её применения) характеризуют её качество и способность ЦСФ защитить СОЖ от негативного воздействия внешних физических, физико-химических и т. п. факторов. Потери СОЖ характеризуются значением объёма сбрасываемых СОЖ и числом замен;

в) увеличение стабильности СОЖ за счёт уменьшения периода времени между коррекциями обеспечивает снижение расхода инструмента в 1,5–3 раза;

г) установлено, что число залповых сбросов в комплексе ЦСФ на её разложение варьируется в интервале 0,7–4,0 1/г; а период времени применения в интервале 0,3–1,71 г, что значительно лучше планируемых при внедрении подсистемы;

д) варьирование концентрации  $\alpha$ , pH, биопоражение СОЖ изменяются во времени по участкам, от относительно небольших значений к относительно большим. Их снижение и стабилизация достигается уменьшением времени между коррекциями.

5. Исключение потерь СОЖ на этапе коррекции возможно при изменении технологии сопровождения функционирования, причём потери при циркуляции целиком и полностью зависят от совершенства ЦСФ и оборудования технологических линий.

6. Стабилизация состава и свойств СОЖ, снижение размаха варьирования показателей  $\alpha$ , pH,  $I_{\text{БП}}$  и других, обеспечиваются посредством уменьшения периода времени между коррекциями с 2 недель до одного дня. Причём это обеспечивается весьма простыми средствами автоматизации с помощью индикатора-уровнемера, связанного с управляемым электрофицированным краном, вентилем и т. д.

### Литература

1. Репин Д.С. Об эффективности активации полимерсодержащих смазочно-охлаждающих технологических средств при механической обработке металлов резанием / Д.С. Репин, А.Г. Наумов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2020. – Т. 24, № 2(88). – С. 36–42. – EDN ZBITXG.
2. Бабаев Э.Р. Смазочно-охлаждающие жидкости: свойства и методы применения / Э.Р. Бабаев // Башкирский химический журнал. – 2022. – Т. 29, № 3. – С. 11–19. – DOI 10.17122/bcj-2022-3-11-19. – EDN OVBRYY.
3. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием : COTC: справочник / Л.В. Худобин, А.П. Бабичев, Е.М. Булыжев [и др.] ; под общ. ред. Л.В. Худобина. – М. : Научно-техническое издательство «Машиностроение», 2006. – 543 с. – ISBN 5-217-03328-2. – EDN QNBIVT.
4. Анализ способов оценки влияния COTC на стойкость твердосплавного инструмента и другие параметры процесса резания / А.А. Жданов, Ж.С. Тихонова, Д.А. Сницар, И.И. Ижбердеев // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2022. – № 3(262). – С. 7–10. – DOI 10.35211/1990-5297-2022-3-262-7-10. – EDN FEWBVB.
5. Sankaranarayanan R. et al. A comprehensive review of the scientific development of vegetable oil-based cutting fluids for solving sustainable machining problems // Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – Т. 67. – P. 286–31.
6. Булыжев Е.М. Ресурсосберегающее применение смазочно-охлаждающих жидкостей при металлообработке / Е.М. Булыжев, Л.В. Худобин. – М. : Машиностроение, 2004. – 352 с. – ISBN 5-217-03266-9. – EDN SUHPAJ.
7. Обшивалкин М.Ю. Повышение эффективности систем очистки СОЖ технологических линий механической обработки заготовок на основе применения системы универсальных технологических критериев : специальность 05.02.08 «Технология машиностроения» : автореф. дис. на соискание уч. степ. канд. техн. наук / Обшивалкин Михаил Юрьевич. – Ульяновск, 1996. – 20 с. – EDN NFBLRH.
8. Wu X. et al. Circulating cleaning of cutting fluid: a review // International Journal of Advanced Manufacturing Technologies. – 2021. – Т. 117. – No. 9. – P. 2565–2600.
9. Sabarinathan C. et al. Influence on tool life when adding nanoparticles with cutting fluid // Materials today : Proceedings. – 2020. – Т. 33. – P.2940–2954.
10. Долгов В.А. Основные подходы к формированию информационной модели производственно-технологической системы машиностроительного предприятия / В.А. Долгов, А.А. Кабанов // Автоматизация. Современные технологии. – 2018. – Т. 72, № 4. – С. 178–184. – EDN HKCHBT.
11. Li H. et al. Cutting fluid corrosion inhibitors from inorganic to organic: progress and applications // Korean Journal of Chemical Engineering. – 2022. – Т. 39. – No. 5. – P. 1107–1134.
12. Kilinkarslan E., Kilinkarslan S.K., Cetin M.H. Evaluation of pure nanocutting fluid taking into account tribological characteristics and cost parameters // Tribology International. – 2021. – Т. 157. – P. 106916.
13. Sen B. et al. Eco-friendly cutting fluids in minimal quantities through machining: a review of perceptions of sustainable manufacturing // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technologies. – 2021. – Т. 8. – P. 249–280.
14. Zheng J. et al. Regulation of cutting fluid parameters for optimal energy and economic indicators: methods of efficient and energy-saving electromechanical processing // Energy Transformation and Management. – 2024. – Т. 314. – S. 118707.
15. Barać M. et al. Optimizing cutting fluid usage in cutting processes on CNC machines: A conceptual digital twin model for ecological sustainability // Acta Technica Jaurinensis. – 2023. – Т. 16. – № 3. – С. 90–98.
16. Kai Yang, Peihua Qiuges. Adaptive Process Monitoring Using Covariate Information // Technometrics. 2021. V. 63(3). P. 313–328.
17. Toussaint-Jimenez N., W. Marimón-Bolívar, E. Domínguez. Estimation of a global self-purification capacity index for Mountain Rivers from water quality data and hydrotopographic characteristics // Congreso Internacional de Innovación y Ingeniería (CONIITI). 2020. P.1–10.
18. Abdelrazek A.H. et al. Metal cutting lubricants and cutting tools: a review of productivity improvements and sustainability assessment // International Journal of Advanced Manufacturing Technologies. – 2020. – Т. 106. – No. 9. – P. 4221–4245.
19. Khanna N. et al. In pursuit of a sustainable cutting fluid strategy for Ti-6Al-4V machining using life cycle analysis. Sustainable Materials and Technologies. – 2021. – Т. 29. – P. e00301.
20. Wang B.A Multicategory Kernel Distance Weighted Discrimination Method for Multiclass Classification / B. Wang, H. Zou // Technometrics. 2019. v.61(3). P. 396–408.



21. Paynabar K.A Change-Point Approach for Phase-I Analysis in Multivariate Profile Monitoring and Diagnosis / K. Paynabar, Ch. Zou, P. Qiu // *Technometrics*. 2016. v. 58(2) P. 191–204.
22. Ben Said L. et al. The use of nanofluids as cutting fluids in machining: a brief review // *Applied Nanoscience*. – 2023. – T. 13. – No. 6. – P. 4247–4278 и Xue S. et al. Improved lubrication of water-based cutting fluid functionalized with GO // *Tribology Letters*. – 2020. – T. 68. – P. 1–14.

# References

1. Repin D.S. On the efficiency of activation of polymer-containing lubricating and cooling technological agents during mechanical cutting of metals / D.S. Repin, A.G. Naumov // *Bulletin of Ufa State Aviation Technical University*. – 2020. – Vol. 24, No. 2 (88). – Pp. 36–42. – EDN ZBITXG.
2. Babaev E.R. Cooling and lubricating fluids: properties and methods of application / E.R. Babaev // *Bashkir Chemical Journal*. – 2022. – Vol. 29, No. 3. – Pp. 11–19. – DOI 10.17122/bcj-2022-3-11-19. – EDN OVBRYV.
3. Lubricating and cooling technological means and their application in cutting processing: Cooling lubricants: reference book / L.V. Khudobin, A.P. Babichev, E.M. Bulyzhev [et al.]; under the general editorship of L.V. Khudobin. – Moscow: Scientific and technical publishing house "Mashinostroenie", 2006. – 543 p. – ISBN 5-217-03328-2. – EDN QNBJVT.
4. Analysis of methods for assessing the influence of cutting fluids on the durability of carbide tools and other parameters of the cutting process / A.A. Zhdanov, Zh.S. Tikhonova, D.A. Snitsar, I.I. Izhberdeev // *Bulletin of the Volgograd State Technical University*. – 2022. – No. 3 (262). – P. 7–10. – DOI 10.35211/1990-5297-2022-3-262-7-10. – EDN FEWBVB
5. Sankaranarayanan R. et al. A comprehensive review of the scientific development of vegetable oil-based cutting fluids for solving sustainable machining problems // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – T. 67. – P. 286–31.
6. Bulyzhev, E.M. Resource-saving Application of Cutting Fluids in Metalworking / E.M. Bulyzhev, L.V. Khudobin. – Moscow: Mashinostroenie, 2004. – 352 p. – ISBN 5-217-03266-9. – EDN SUHPAJ.
7. Obshivalkin M.Yu. Improving the efficiency of coolant cleaning systems for technological lines for mechanical processing of workpieces based on the use of a system of universal technological criteria: specialty 05.02.08 "Mechanical Engineering Technology": author's abstract. dis. for the degree of candidate of technical sciences / Obshivalkin Mikhail Yuryevich. – Ulyanovsk, 1996. – 20 p. – EDN NFBLRH.
8. Wu X. et al. Circulating cleaning of cutting fluid: a review // *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*. – 2021. – T. 117. – No. 9. – P. 2565–2600.
9. Sabarinathan C. et al. Influence on tool life when adding nanoparticles with cutting fluid // *Materials today : Proceedings*. – 2020. – T. 33. – P.2940–2954.
10. Dolgov V.A. Basic approaches to the formation of an information model of the production and technological system of a mechanical engineering enterprise / V.A. Dolgov, A.A. Kabanov // *Automation. Modern technologies*. – 2018. – Vol. 72, No. 4. – P. 178–184. – EDN HKCHBT.
11. Li H. et al. Cutting fluid corrosion inhibitors from inorganic to organic: progress and applications // *Korean Journal of Chemical Engineering*. – 2022. – T. 39. – No. 5. – P. 1107–1134.
12. Kilinkarslan E., Kilinkarslan S.K., Cetin M.H. Evaluation of pure nanocutting fluid taking into account tribological characteristics and cost parameters // *Tribology International*. – 2021. – T. 157. – P. 106916.
13. Sen B. et al. Eco-friendly cutting fluids in minimal quantities through machining: a review of perceptions of sustainable manufacturing // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technologies*. – 2021. – T. 8. – P. 249–280.
14. Zheng J. et al. Regulation of cutting fluid parameters for optimal energy and economic indicators: methods of efficient and energy-saving electromechanical processing // *Energy Transformation and Management*. – 2024. – T. 314. – S. 118707.
15. Barać M. et al. Optimizing cutting fluid usage in cutting processes on CNC machines: A conceptual digital twin model for ecological sustainability // *Acta Technica Jaurinensis*. – 2023. – T. 16. – No. 3. – pp. 90–98.
16. Kai Yang, Peihua Qiuges. Adaptive Process Monitoring Using Covariate Information // *Technometrics*. 2021. V. 63(3). P. 313–328.
17. Toussaint-Jimenez N., W. Marimón-Bolivar, E. Dominguez. Estimation of a global self-purification capacity index for Mountain Rivers from water quality data and hydrotopographic characteristics // *Congreso Internacional de Innovación y Ingeniería (CONIITI)*. 2020. R.1–10.
18. Abdelrazek A.H. et al. Metal cutting lubricants and cutting tools: a review of productivity improvements and sustainability assessment // *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*. – 2020. – T. 106. – No. 9. – P. 4221–4245.
19. Khanna N. et al. In pursuit of a sustainable cutting fluid strategy for Ti-6Al-4V machining using life cycle analysis. *Sustainable Materials and Technologies*. – 2021. – T. 29. – P. e00301.
20. Wang B.A Multicategory Kernel Distance Weighted Discrimination Method for Multiclass Classification / B. Wang, H. Zou // *Technometrics*. 2019. v.61(3). P. 396–408.
21. Paynabar K.A Change-Point Approach for Phase-I Analysis in Multivariate Profile Monitoring and Diagnosis / K. Paynabar, Ch. Zou, P. Qiu // *Technometrics*. 2016.v. 58(2) pp. 191–204.
22. Ben Said L. et al. The use of nanofluids as cutting fluids in machining: a brief review // *Applied Nanoscience*. – 2023. – T. 13. – No. 6. – P. 4247–4278 and Xue S. et al. Improved lubrication of water-based cutting fluid functionalized with GO // *Tribology Letters*. – 2020. – T. 68. – P. 1–14.