

УДК 621.9.079

ОЦЕНКА, КОНТРОЛЬ, МОНИТОРИНГ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ (СТАБИЛЬНОСТЬЮ) ПРОЦЕССА ПРИМЕНЕНИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ СОЖ ПРИ МЕХАНООБРАБОТКЕ В УСЛОВИЯХ МАССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

© 2025 Е.М. Булыжев¹, В.Н. Клячкин¹, В.Г. Тронин¹, Ю.Б. Алякин²

¹ Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

² Ульяновский государственный университет, г. Ульяновск, Россия

Статья поступила в редакцию 01.07.2025

В результате ретроспективного анализа применения СОЖ при металлообработке установлено, что его развитие шло по двум направлениям: улучшение физико-химических и технологических свойств СОЖ, полученных на основе концентратов, и совершенствование системных технологий централизованного сопровождения функционирования (ЦСФ) СОЖ, в том числе, централизованного. В связи с продвижением в РФ синтетических СОЖ с высокой способностью противостоять негативным внешним воздействиям наблюдали эффекты продления срока эксплуатации СОЖ между заменами, но значительно менее ожидаемых. При анализе причин снижения срока эксплуатации СОЖ установили, что это обусловлено относительно редкой коррекцией неизбежных распределенных потерь СОЖ. Данные потери обусловлены состоянием производственной системы «СОЖ – ЦСФ – технологическая линия». Выявление данного факта вызвало понимание возникновения проблемных ситуаций, заключающихся в возможности использования оценки распределенных неизбежных потерь СОЖ для контроля, мониторинга ЦСФ и производственной системой. Для разрешения проблемной ситуации и подтверждения научной гипотезы о возможности организации контроля, мониторинга и управления производственным процессом металлообработки, протекающего при функционировании СОЖ, на основе текущей оценки её распределенных неизбежных потерь во времени, были проведены инициативные исследования. Цель проведенных исследований заключалась в подтверждении вышеупомянутой гипотезы. Явление варьирования неизбежных распределенных потерь СОЖ в ЦСФ комплекса её функционирования проводили на основе систематизации результатов и их преобразования во временные ряды в период между заменами СОЖ. Варьирование СОЖ исследовали с позиций вероятностно-детерминированного подхода на комплексе из 27 ЦСФ в течение периода времени между заменами. Для этого выполнили формирование цифрового контента значений скорости неизбежных распределенных потерь СОЖ на всех ЦСФ комплекса с варьированием эксплуатационных показателей и принципиальной возможности создания индикативного способа контроля, мониторинга СОЖ и т.д.

Ключевые слова: синтетическая смазочно-охлаждающая жидкость, централизованная система применения, неизбежные распределенные потери, контроль, мониторинг.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-6-150-157

EDN: YLXKHH

ВВЕДЕНИЕ

Водные смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) являются неотъемлемой составляющей процесса механообработки [1-10]. Повышенный срок эксплуатации синтетических и полусинтетических (СиПС) СОЖ стал стимулом их продвижения на рынке в РФ [1-3]. Однако нередко на практике выявляли случаи многократного снижения срока функционирования синтетических СОЖ между заменами [3,4]. Установленные причины снижения декларируемого срока эксплуатации синтетической СОЖ:

- не контролируемые и не компенсируемые (не корректируемые) в реальном времени ΔT неизбежные распределенные потери объема СОЖ ΔV в зоне обработки и в инфраструктуре производственной технологической системы;
- отсутствие инструментария и систем управления процессом функционирования СОЖ и процессом обработки заготовок деталей с помощью регулирования потерь в реальном времени;
- накопление изменений в составе СОЖ, вызывающее снижение её технологической эффек-

Булыжев Евгений Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры инновационные технологии в машиностроении. E-mail: eugbul1946@gmail.com

Клячкин Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры прикладная математика и информатика. E-mail: v_kl@mail.ru

Тронин Вадим Георгиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем.

E-mail: vadingt77@gmail.com

Алякин Юрий Борисович, аспирант. E-mail: kontro73@yandex.ru

тивности и приводящее к необходимости её замены. Результат – условно бесполезные потери. Кроме того, наблюдается учащение числа замен СОЖ в течение года n_z и превышение потерь СОЖ.

Выявленный научный факт снижения/повышения потерь синтетических СОЖ по сравнению с рекомендуемым отвечает следующим критериям:

- 1) он может быть воспроизведен при исследовании всех централизованных систем комплекса сопровождения функционирования (ЦСФ) СОЖ на предприятии Завод двигателей;
- 2) его можно проверить при помощи различных способов;
- 3) он допускает возможность однозначного использования в связи с дальнейшим изучением комплекса ЦСФ синтетической СОЖ завода двигателей.

Выявленный факт соответствует предпосылкам, сформулированным в работе [3,5]. СОЖ в зоне обработки испытывает негативное воздействие множества факторов (рисунок 1) [3]. Совокупность нежелательных явлений, проявляющихся в СОЖ, представлена в работе [6]. Эта совокупность оказывает негативное воздействие на СОЖ, вызывает ухудшение её технологической эффективности и приводит к полной замене синтетической жидкости после истечения некоторого периода времени t_g [7].

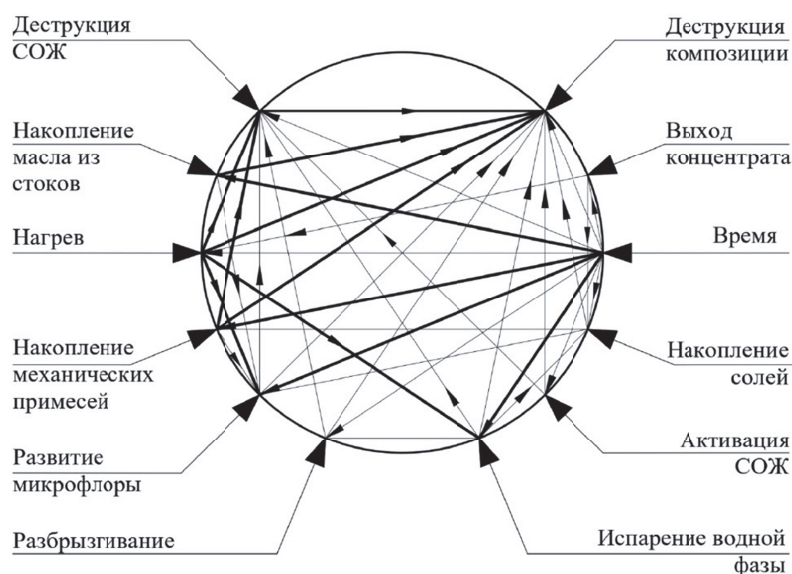


Рис. 1. Граф деградации синтетической СОЖ

На достоверность и обоснованность выявленного научного факта оказали прямое влияние:

- характер инвариантной составляющей, проявляемый в виде двух основных факторов, совместно влияющих на срок функционирования СОЖ между заменами – качество самих СОЖ, как рабочего тела в плане противостояния внешним негативным воздействиям, и способность технологической структуры ЦСФ предотвращать или компенсировать последствия негативного воздействия внешних факторов на СОЖ;

- теоретическая (переменная) варианта, выявленная в ходе многолетних наблюдений, в том числе, на 4 ЦСФ на ООО «УАЗ»;

- синергия воздействия двух групп факторов на СОЖ.

Таким образом возникла и назрела проблемная ситуация:

- синтетическая СОЖ теряет часть объема (распределенные и неизбежные потери) при прохождении зоны резания и инфраструктуры ЦСФ. Период времени применения синтетических СОЖ менее заявляемых производителем;

- объем распределенных неизбежных потерь отражает эффективность эксплуатации СОЖ, ЦСФ и технологическую эффективность производства;

- периодически по мере потери жидкостью технологического качества, отработавшую СОЖ сбрасывают на разрушение, разложение и утилизацию отделенных фаз и водных стоков.

В соответствии с теоретическими представлениями сформирована научная гипотеза о возможности и целесообразности использования показателя – скорости распределенных неизбежных потерь СОЖ v , $\text{м}^3/\text{ч}$, в качестве критерия качества функционирования самой синтетической СОЖ, эффективности ЦСФ и технологической эффективности производства, в котором они используются.

С позиций возможностного подхода авторами использован принцип «черного ящика», характерный для исследуемых, в данном случае, объектов.

При функционировании водоземulsionных СОЖ из-за её склонности к биопоражению, подверженности расслоению и малого срока функционирования гипотеза о возможности использования

скорости неизбежных распределенных потерь водоземлюсионных СОЖ в качестве интегрированного критерия не могла возникнуть.

Исходным пунктом возникновения проблемы является противоречие между знанием о потребностях практических действий и незнанием путей и способов осуществления действий, обеспечивающих качественное функционирование СОЖ.

Научная проблема в связи с выявленным фактом, заключается в доказательстве возможности и целесообразности применения критерия неизбежные распределенные потери синтетических СОЖ для оценки, контроля, мониторинга качества применения СОЖ в режиме «on-line» и планирования при эксплуатации комплексов сопровождения функционирования синтетических СОЖ и методики их исследования.

Рабочая гипотеза заключается в том, что регулярное измерение перепада высот уровня СОЖ в емкости ЦСФ ДН, соотносимые с временем достижения ΔT , позволяют оценить величину, объем и скорость потерь СОЖ за время ΔT , а также среднюю величину в случае их варьирования.

Проверим выполнение условий самостоятельности выдвинутой гипотезы с помощью применяемых требований:

1. Согласие с фактическим материалом для объяснения которого и была выдвинута гипотеза. Выдвинутая гипотеза не должна противоречить известным законам и теориям, что и наблюдается в нашем случае (рисунок 1 и таблица 1). Сопоставление гипотезы с фактами будет представлено ниже и преемственно связано со знаниями изложенными в [1-7].

2. Принципиальная проверяемость гипотезы.

3. Максимальная общность и прилагательность к широкому кругу ЦСФ в комплексе.

4. Принципиальная простота гипотезы, состоящая в её способности исходя из относительно немногих оснований, объяснить широкий круг явлений в комплексе ЦСФ.

В литературных источниках не обнаружены сведения о проведении и методах организации экспериментальных исследований эксплуатационной эффективности комплекса централизованных систем функционирования СОЖ.

При рассмотрении вышеописанной проблемной ситуации возникают следующие вопросы:

1. Выявлен ли факт варьирования потери части объема СОЖ при прохождении зоны резания и инфраструктуры любой ЦСФ?

2. Отражает ли варьирование объема распределенных неизбежных потерь эффективность функционирования СОЖ, ЦСФ и технологическую эффективность производства?

ЦЕЛЬ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью проведенных исследований являлось подтверждение варьировании объемов неизбежных распределенных потерь СОЖ при эксплуатации СОЖ во всех централизованных системах комплекса при разнообразии технологических ситуаций и возможности использования его в качестве индикатора эффективности.

Объектом исследования был избран комплекс централизованных систем применения водных СОЖ, в том числе, синтетических, полусинтетических и их смесей. Выявили следующие обстоятельства:

а) комплекс существовал и существует независимо от наблюдателя на одном из заводов двигателей;

б) понимание комплекса во всем многообразии ЦСФ может обеспечить его совершенствование, особенно в части сбережения СОЖ, как одного из важнейших ресурсов при металлообработке, а также может быть отражен в виде технологических рекомендаций при проектировании комплексов ЦСФ в дальнейшем;

в) исследования комплекса ЦСФ нацеливались на изучение всех сторон, связей и свойств объекта в парадигме системного подхода к процессу эксплуатации комплекса в условиях существующего производства;

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

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В связи с отсутствием сколько-нибудь обоснованных методологических разработок по организации исследований процессов функционирования СиПС СОЖ в комплексах централизованных систем разрабатывалась энтропийная методология исследований с учетом специфики технологических поточных линий в условиях массового производства.

На начальном этапе на уровне эмпирического познания осуществляли анализ уже накопленно-

го контента информации об исследуемом комплексе ЦСФ и произвели первичную систематизацию полученных знаний о потерях (энтропии) СОЖ в форме таблиц, диаграмм, графиков и на их основе, проявления ситуаций со стабильностью ($v' = \text{const}$) и нестабильностью ($v' \neq \text{const}$) скорости распределенных неизбежных потерь объемов СОЖ за один цикл оборота в ЦСФ, за 1 час и средних по ЦСФ и группам ЦСФ.

Поскольку результаты наблюдений входили в другие процедуры: сравнение, измерение и «пассивный» эксперимент.

Наблюдения производились непосредственно на сооружениях ЦСФ СОЖ комплекса, с использованием простейших средств, установленных на емкостях, например, уровнемеры для измерения значений заглубления уровня СиПС СОЖ в паузах процесса её периодической циркуляции на поточных линиях механообработки конкретных заготовок и на всех других этапах эксплуатации жидкости и др.

Описание проводили в соответствии с особенностями технологической ситуации (ТС) ЦСФ СиПС СОЖ.

При качественном описании упор делали на вид СОЖ, характер обработки, материал заготовки обрабатываемой детали, а также общую характеристику поточной технологической линии, в том числе, автоматической. Качественное описание передавало общее знание о комплексе ЦСФ. Количественное описание при исследовании предполагало числовую характеристику свойств, сторон и связей (внешних и внутренних) элементов ЦСФ комплекса. Например, производительность ЦСФ, объем емкостей для СОЖ, число оборотов СОЖ в единицу времени при ее циркуляции $n'_{\text{цс}}$, число коррекций потери объемов и число их замен.

Наблюдение предполагало исполнение двух функций: обеспечение эвристической информации о ЦСФ и проверку выдвигаемой гипотезы и теоретических посылок.

В случае успешного решения задачи возникла проблема организации проведения способа использования потерь синтетических СОЖ для оценки, контроля, мониторинга и планирования процесса эксплуатации СОЖ, а также процесса производства металлообработки заготовок деталей двигателей.

Предмет проводимого исследования – явление распределенных неизбежных потерь синтетических СОЖ при обороте в ЦСФ и периодические замены отработавшей СОЖ.

Научная гипотеза заключается в том, что при проводимом исследовании неизбежных распределенных потерь в течение периода времени между заменами СОЖ возможна выработка принципа систематизации потерь ЦСФ, формирования цифровых двойников, выявление индикатора, позволяющего разработать процедуры оценки, контроля потерь и мониторинга состояния СОЖ в ЦСФ, упростить принятие обоснованного решения для предотвращения сбоя в эксплуатации СОЖ, приводящего к незапланированной замене СиПС СОЖ и остановке производств.

Исследования проводились с позиций вероятностно-детерминированного подхода при использовании вариационного параметрического анализа. При исследованиях производили оценку неизбежных распределенных потерь СОЖ, как «условно полезной энтропии» для данных ЦСФ и технологических ситуаций.

Оценку скорости неизбежных распределенных потерь СОЖ производили посредством замера заглубления уровня ΔH в течение ΔT в емкости ЦСФ в ночное время, в перерыве при остановке системы и успокоении уровня по методике изложенной в работе [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рисунках 2 и 3 представлены временные ряды варьирования средних значений скорости распределенных неизбежных потерь объемов СОЖ в период между коррекциями. Временной ряд охватывает период времени между смежными заменами СОЖ. Для представленных на рисунках в рядах для всех ЦСФ выделены фигурными скобками зоны стабильности при $v' = \text{const}$ и зоны нестабильности при $v' \neq \text{const}$ между первыми.

Протяженность и количество зон стабильности и нестабильности (критерий качества) для всех технологических ситуаций варьируются в достаточно широком интервале.

Анализ совокупности (рисунок 2) показал следующее:

- 1) всем технологическим ситуациям, соответствующим применению синтетических и полусинтетических СОЖ в ЦСФ, присущи проявления зон стабильности или нестабильности скорости распределенных неизбежных потерь v , $\text{м}^3/\text{ч}$, или v' , $\text{м}^3/\text{об}$;
- 2) варьирование количества, зон стабильности и нестабильности v и v' наблюдается для всех ЦСФ;
- 3) отсутствует информация о возможности раздельной оценки эффективности СОЖ, ЦСФ и технологической линии, во всех случаях зафиксирована интегрированная оценка эффективности по принципу матрешки (вложенных систем) [9].

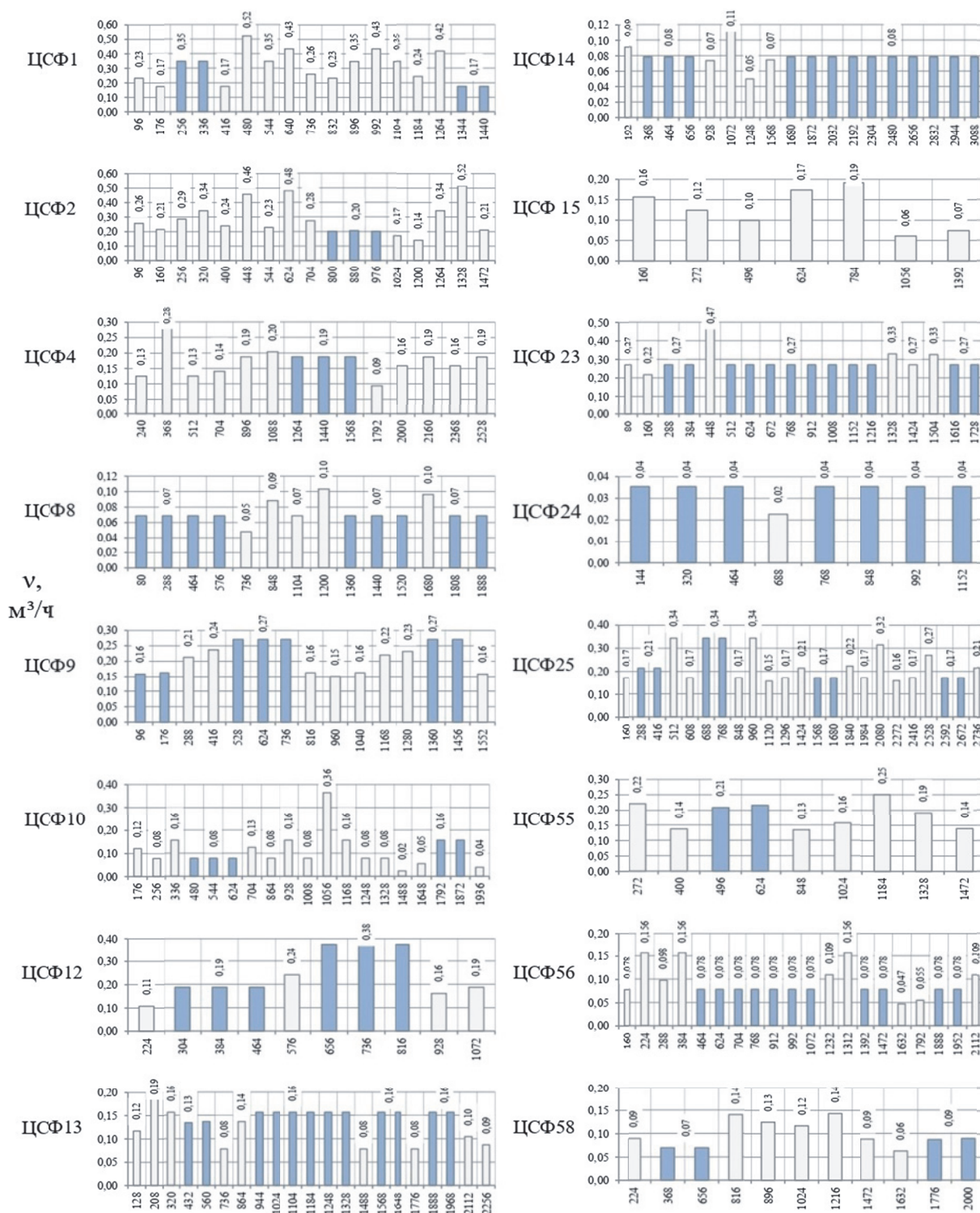


Рис. 2. Временные ряды значений скорости потерь объемов синтетической СОЖ в ЦСФ

Для выявления характера изменения основных эксплуатационных показателей были использованы временные ряды варьирования часовой скорости потерь объемов v СиПС СОЖ в периодах между коррекциями на протяжении периода времени между заменами СОЖ (рисунок 5). Установлено, что для всех ЦСФ (всех ТС) наблюдались как участки стабильности ($v = \text{const}$), так и нестабильности ($v \neq \text{const}$). Это наблюдение привело к пониманию возможности использования v (или v') для контроля и мониторинга качества процесса применения СОЖ, ЦСФ, а также системы более высокого уровня, характерной для варианта ТС. На рисунке 5 показаны изменения v для ЦСФ 13, 14, 23, 56, 63, 70, 72 и 76. Участки стабильности перемешаны с участками нестабильности. Данный метод является методом индикативного контроля уровней качества (стабильность) СОЖ, ЦСФ и производственной системы по ТС и в целом.

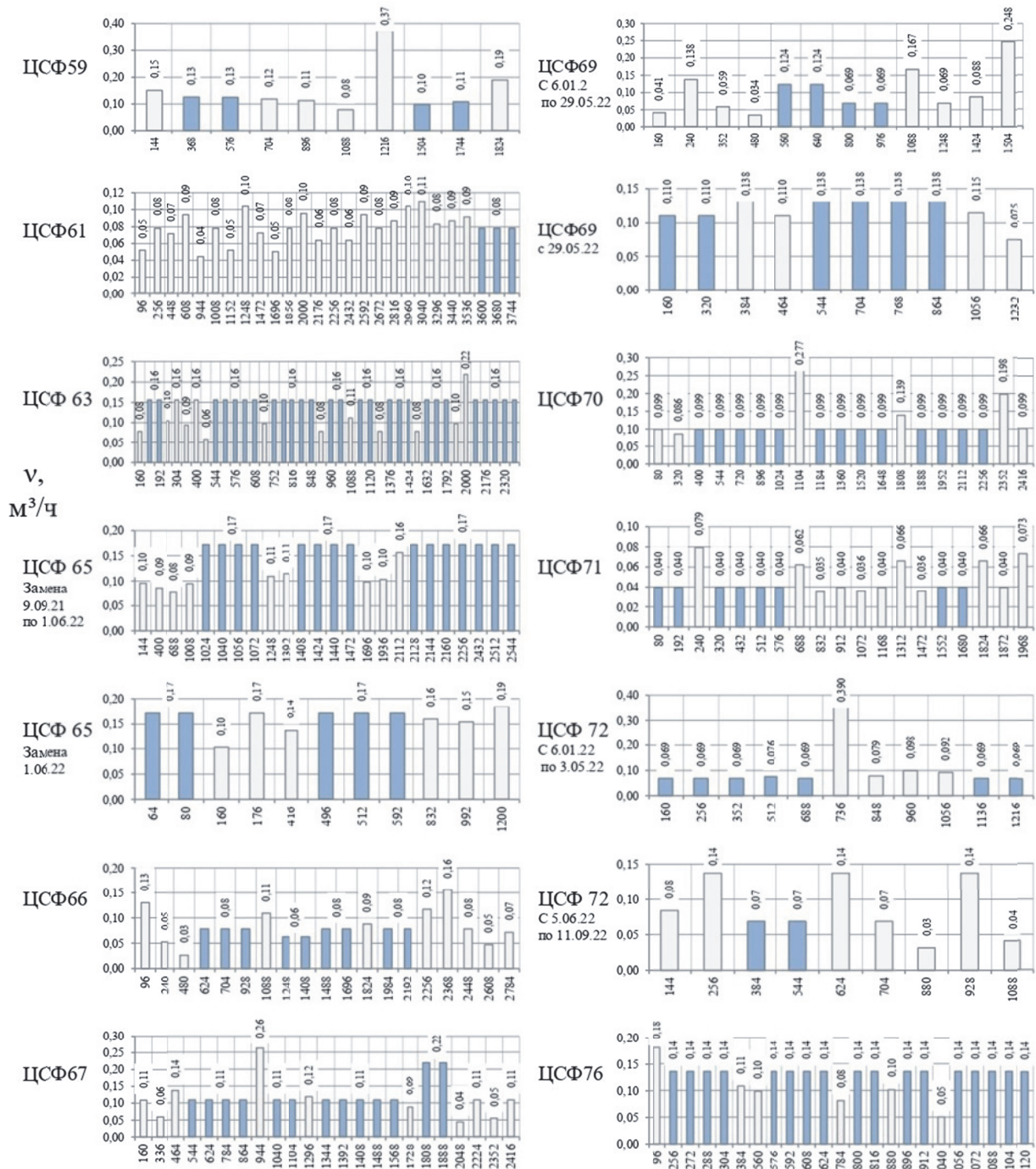


Рис. 3. Временные ряды значений скорости потерь объемов СОЖ в ЦСФ

Варьирование величины T , позволяет управлять варьированием качества СОЖ, а тем самым управлять и процессом механообработки

Очевидно, что использование v и v' для оценки, контроля, мониторинга управления, планирования качества применения СОЖ, ЦСФ и технологического качества производственной системы по ТС и в целом целесообразно для ситуационного «усредненного» восприятия положения, складывающегося на производстве СОЖ ТС и ЦСФ, в том числе, как по ЦСФ N , так и по комплексу в целом.

Во многих случаях в значении точных количественных результатов нет необходимости, а вот в надежной и своевременной оценке с помощью «баллов» есть необходимость.

ВЫВОДЫ

1. Выполнены исследования по оценке состояния гибридной производственной системы, организованной по принципу матрицы «СОЖ – ЦСФ – производственная технологическая линия», с помощью оценки неизбежных распределенных потерь.

2. Подтверждена возможность такой оценки для всех исследованных ситуаций с применением СОЖ во всех ЦСФ комплекса.

3. На основе использования такой оценки непрерывно в «on-line» режиме возможен мониторинг и ситуационное управление производственной системой, функционирующей с централизованным применением СОЖ.

4. Полученная информация упрощает управление производством, позволяет получить данные для планирования последующих длительных периодов в эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 OVBRVY.
3. Худобин, Л. В. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием : СОТС: справочник / Л. В. Худобин, А. П. Бабичев, Е. М. Бульжев [и др.], под общей редакцией Л. В. Худобина. – М.: Научно-техническое издательство «Машиностроение», 2006. – 543 с. – ISBN 5-217-03328-2. – EDN QNBVJT.
4. Жданов, А. А. Анализ способов оценки влияния СОТС на стойкость твердосплавного инструмента и другие параметры процесса резания / А. А. Жданов, Ж. С. Тихонова, Д. А. Сницар, И. И. Избердеев // 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. Бульжев, Е. М. Ресурсосберегающее применение смазочно-охлаждающих жидкостей при металлообработке / Е. М. Бульжев, Л. В. Худобин. – М.: Машиностроение, 2004. – 352 с. – ISBN 5-217-03266-9. – EDN SUHPAJ.
7. 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.
8. Бульжев, Е.М. Варьирование и методика оценки качества процесса применения синтетических СОЖ при механической обработке в условиях массового производства / Е.М. Бульжев, В.Н. Клячкин, В.Г. Тронин, Ю.Б. Алякин, А.Ф. Денисенко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 28. – № 5. – С. 62-67.
9. Буков, В. Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем / В. Н. Буков. – Калуга: Изд-во научной литературы Н.Ф. Бочкаревой, 2006. – 720 с.

EVALUATION, CONTROL, MONITORING, AND MANAGEMENT OF THE QUALITY (STABILITY) OF SYNTHETIC CUTTING FLUIDS IN MASS-PRODUCTION MACHINING

© 2025 E.M. Bulyzhev¹, V.N. Klyachkin¹, V.G. Tronin¹, Yu.B. Alyakin²

¹ Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

² Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia

A retrospective analysis of cutting fluids in metalworking revealed that their development has proceeded in two directions: improving the physicochemical and technological properties of cutting fluids obtained from concentrates, and improving systems technologies for centralized control of cutting fluids, including centralized control. With the advancement of synthetic cutting fluids with high resistance to adverse external influences in the Russian Federation, some effects have been observed extending the service life of cutting fluids between replacements, but significantly less than expected. An analysis of the causes of the reduced cutting fluid service life revealed that this is due to the relatively infrequent correction of inevitable distributed losses of cutting fluid. These losses are caused by the state of the “cutting fluid - center cooling fan - process line” production system. This discovery led to an understanding of the potential for using estimates of distributed inevitable coolant losses to control and monitor the center cooling fan and the production system. To address this issue and confirm the scientific hypothesis regarding the feasibility of organizing control, monitoring, and management of the metalworking process occurring during the operation of cutting fluids based on an ongoing assessment of their distributed inevitable losses over time, proactive research was conducted. The purpose of the research was to confirm the above-mentioned hypothesis. The phenomenon of variation in inevitable distributed coolant losses in a central cooling system (CSF) complex was analyzed based on systematization of results and their transformation into time series during the period between coolant changes. Coolant variations were studied using a probabilistic-deterministic approach on a complex of 27 CSFs during the period between changes. For this purpose, digital data was generated for the rate of inevitable distributed coolant losses across all CSFs in the complex, with varying operating parameters and the fundamental possibility of developing an indicative method for coolant control and monitoring, etc.

Keywords: synthetic cutting fluid, centralized application system, inevitable distributed losses, control, monitoring.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-6-150-157

EDN: YLXKHH

REFERENCES

1. *Repin, D. S.* Ob effektivnosti aktivacii polimersoderzhashchih smazочно-ohlazhdayushchih tekhnologicheskikh sredstv pri mekhanicheskoy obrabotke metallov rezaniem / D. S. Repin, A. G. Naumov // Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tekhnicheskogo universiteta. – 2020. – T. 24, № 2(88). – S. 36-42. – EDN ZBITXG.
2. *Babaev, E. R.* Smazочно-ohlazhdayushchie zhidkosti: svoystva i metody primeneniya / E. R. Babaev // Bashkirskij himicheskij zhurnal. – 2022. – T. 29, № 3. – S. 11-19. – DOI 10.17122/bcj-2022-3-11-19. – EDN OVBRYV.
3. *Hudobin, L. V.* Smazочно-ohlazhdayushchie tekhnologicheskie sredstva i ih primeneniye pri obrabotke rezaniem : SOTS: spravochnik / L. V. Hudobin, A. P. Babichev, E. M. Bulyzhev [i dr.] ; pod obshchej redakciej L. V. Hudobina. – M. : Nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo «Mashinostroenie», 2006. – 543 s. – ISBN 5-217-03328-2. – EDN QNBjVT.
4. *Zhdanov, A. A.* Analiz sposobov ocenki vliyaniya SOTS na stojkost' tverdosplavnogo instrumenta i drugie parametry processa rezaniya / A. A. Zhdanov, Zh. S. Tihonova, D. A. Snicar, I. I. Izhberdeev // Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2022. – № 3(262). – S. 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.* Resursosberegayushchee primeneniye smazочно-ohlazhdayushchih zhidkostej pri metalloobrabotke / E. M. Bulyzhev, L. V. Hudobin. – M. : Mashinostroenie, 2004. – 352 s. – ISBN 5-217-03266-9. – EDN SUHPAJ.
7. *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.
8. *Bulyzhev, E. M.* Var'irovaniye i metodika ocenki kachestva processa primeneniya sinteticheskikh SOZh pri mekhanooobrabotke v usloviyakh massovogo proizvodstva / E. M. Bulyzhev, V. N. Klyachkin, V. G. Tronin, Yu. B. Alyakin, A. F. Denisenko // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. – 2025. – T. 28. – № 5. – S. 62-67.
9. *Bukov, V. N.* Vlozheniye sistem. Analiticheskij podhod k analizu i sintezu matrichnyh sistem / V. N. Bukov. – Kaluga: Izd-vo nauchnoj literatury N. F. Bochkarevoj, 2006. – 720 s.

Evgeny Bulyzhev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Innovative Technologies in Mechanical Engineering. E-mail: eugbul1946@gmail.com

Vladimir Klyachkin, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Applied Mathematics and Computer Science. E-mail: v_kl@mail.ru

Vadim Tronin, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Information Systems. E-mail: vadingt77@gmail.com

Yuri Alyakin, Graduate Student. E-mail: kontro73@yandex.ru