

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОПРОВОЖДЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СОЖ В МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩИХ ПОТОЧНЫХ ЛИНИЯХ В УСЛОВИЯХ МАССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Ю.Б. Алякин¹, *kontro73@yandex.ru*
Е.М. Булыжев², *eugbul1946@gmail.com*
В.Г. Тронин², *vadimgt77@gmail.com*
А.М. Золотов³, *a.zolotov@mail.spbstu.ru*
Д.Л. Скуратов⁴, *skuratov@ssau.ru*

¹ Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия

² Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

⁴ Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева,
Самара, Россия

Аннотация. Ретроспективный анализ эффективности смазочно-охлаждающих жидкостей при механообработке показал, что совершенствование процесса её функционирования шло по двум направлениям: улучшение технологических свойств самой смазочно-охлаждающей жидкости, приготавливаемой на основе серийно выпускаемых концентратов, и разработки более эффективных систем сопровождения функционирования.

В последнее время в РФ вместе с инновационными технологиями изготовления в машиностроении, автомобилестроении и металлургии стали продвигаться синтетические смазочно-охлаждающие жидкости. Однако ожидание многократного снижения потерь смазочно-охлаждающих жидкостей в связи с её высокой стойкостью подтвердилось не в полной мере.

При анализе причин снижения срока функционирования смазочно-охлаждающих жидкостей выявили, что это обусловлено неизбежными распределёнными её потерями при функционировании, зависящими от структур и состояния производственных вложенных систем «смазочно-охлаждающая жидкость – система сопровождения – технологическая линия».

Авторами была выдвинута рабочая гипотеза о возможности использования неизбежных распределённых потерь смазочно-охлаждающих жидкостей в качестве критерия, характеризующего эксплуатационную эффективность производственных систем.

Цель проведённых исследований заключалась в подтверждении выдвинутой гипотезы и её использовании в дальнейшем при исследовании технологических процессов, протекающих в среде смазочно-охлаждающих жидкостей в условиях поточных линий механообработки заготовок деталей на машиностроительных предприятиях при широком варьировании технологических ситуаций.

Методика исследований заключалась в сборе и анализе изменений объёма смазочно-охлаждающих жидкостей в ёмкости системы сопровождения во времени и выявлении скорости неизбежных распределённых потерь и числа замен в комплексе централизованных систем сопровождения их функционирования.

В результате выяснилось, что скорость неизбежных распределённых потерь смазочно-охлаждающих жидкостей может быть использована для индикативной оценки системной эффективности в качестве высокочувствительного критерия – индикатора.

В статье представлены результаты проведённых авторами исследований системной эффективности смазочно-охлаждающих жидкостей в комплексе централизованных систем сопровождения их функционирования методом пассивного эксперимента при широком варьировании технологических ситуаций, характеризующихся видом обработки, типом и материалом заготовки.

Ключевые слова: смазочно-охлаждающие жидкости, неизбежные распределённые потери, потери при заменах, скорость потерь

Для цитирования: Оценка эффективности сопровождения функционирования СОЖ в механообработывающих поточных линиях в условиях массового производства / Ю.Б. Алякин, Е.М. Булыжев, В.Г. Тронин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2026. Т. 26, № 1. С. 62–77. DOI: 10.14529/engin260106

Original article
DOI: 10.14529/engin260106

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF SUPPORTING METALWORKING-FLUID (MWF) OPERATION IN MACHINING FLOW LINES UNDER MASS-PRODUCTION CONDITIONS

Yu.B. Alyakin¹, kontro73@yandex.ru
E.M. Bulyzhev², eugbul1946@gmail.com
V.G. Tronin², vadimgt77@gmail.com
A.M. Zolotov³, a.zolotov@mail.spbstu.ru
D.L. Skuratov⁴, skuratov@ssau.ru

¹ Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia

² Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

³ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

⁴ Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia

Abstract. A retrospective analysis of the effectiveness of metalworking fluids (MWFs) in machining showed that improvements in their performance have followed two paths: enhancing the technological properties of the fluids themselves (prepared from commercially produced concentrates) and developing more effective systems to support their operation. Recently in the Russian Federation, along with innovative manufacturing technologies in mechanical engineering, automotive, and metallurgy, synthetic MWFs have begun to be promoted. However, expectations of a manifold reduction in MWF losses due to their high durability were only partially met.

Analyzing the reasons for reduced service life of MWFs revealed that it is driven by inevitable distributed losses during operation, which depend on the structure and condition of the nested production systems “MWF – support system – process line.” The authors proposed a working hypothesis that these inevitable distributed MWF losses can serve as a criterion characterizing the operational efficiency of production systems.

The aim of the study was to confirm this hypothesis and to use it subsequently when investigating technological processes occurring in MWF media on machining flow lines for workpiece processing at machine-building enterprises, under wide variation of technological situations.

The methodology consisted of collecting and analyzing changes over time in the MWF volume in the support system’s reservoir, determining the rate of inevitable distributed losses, and counting the number of replacements within complexes of centralized systems that support MWF operation.

It was found that the rate of inevitable distributed MWF losses can be used as a highly sensitive indicator for an indicative assessment of systemic efficiency.

The paper presents the authors’ results on the systemic efficiency of MWFs within centralized support-system complexes, obtained by a passive (observational) experiment under broad variation of technological situations characterized by type of machining, workpiece type, and workpiece material.

Keywords: metalworking fluids, inevitable distributed losses, replacement losses, loss rate

For citation: Alyakin Yu.B., Bulyzhev E.M., Tronin V.G., Zolotov A.M., Skuratov D.L. Evaluation of the efficiency of supporting metalworking-fluid (MWF) operation in machining flow lines under mass-production conditions. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2026;26(1):62–77. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin260106

Введение

Повышенный срок эксплуатации синтетических смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) послужил стимулом продвижения в машиностроении в РФ [1–3]. Однако нередко на практике выявили случаи многократного снижения срока функционирования t_{ϕ} синтетических СОЖ между заменами. Вероятные причины снижения t_{ϕ} :

- накапливание изменений в составе СОЖ под действием негативных факторов, воздействующих на СОЖ при их функционировании, вызывающее снижение технологической эффективности и приводящее к её замене;
- неконтролируемые и некомпенсируемые (некорректируемые) в реальном времени Т неизбежные распределённые потери СОЖ в зоне обработки и вне её в системе сопровождения;
- отсутствие инструментария и «адекватной» системы управления процессом функционирования СОЖ.

Выявленный факт увеличения потерь СОЖ, по сравнению с декларируемым фирмами поставщиками, соответствует следующим критериям:

- 1) он может быть воспроизведён при исследовании всех централизованных систем комплекса сопровождения функционирования СОЖ;
- 2) его можно проверить при помощи различных способов, например, фиксации числа замен СОЖ в год.

Выявленный факт соответствует предпосылкам, сформулированным в работе [4]. Любая СОЖ в зоне обработки испытывает циклическое негативное воздействие множества факторов [5].

Совокупность факторов оказывает негативное воздействие на СОЖ как «рабочее тело», уменьшает её объём, ухудшает состав и технологическую эффективность, приводя к преждевременной полной замене СОЖ [6], в том числе синтетических, после истечения t_{ϕ} .

На достоверность и обоснованность выявленного научного факта оказали прямое влияние:

- инвариантная составляющая в виде 2 групп основных факторов, обуславливающих срок функционирования СОЖ между заменами, характеризующими качество СОЖ в плане противостояния внешним негативным воздействиям, и способность системы сопровождения предотвращать или компенсировать последствия негативного воздействия внешних факторов на СОЖ;
- теоретическая варианта, выявленная в ходе многолетних исследований при эксплуатации 4 централизованных систем функционирования (ЦСФ) СОЖ на ООО «УАЗ» в 1994–1998 гг. [7];
- синергия воздействия 2 групп факторов на состав, состояние и свойства СОЖ.

Проблемность ситуации заключается в том, что синтетическая СОЖ теряет часть объёма, что сопровождается трансформацией её состава и ухудшением свойств СОЖ [8–16], а оценить и предотвратить или компенсировать результаты этого процесса сегодня не представляется возможным из-за отсутствия понимания состояния вложенной системы «СОЖ – система сопровождения – технологическая система» [17–23].

В соответствии с теоретическими предпосылками авторами сформулирована гипотеза о возможности и целесообразности использования показателя скорости распределённых неизбежных потерь СОЖ ν ($\text{м}^3/\text{ч}$) в качестве критерия системной эффективности технологического процесса, в котором функционирует СОЖ. Распределённые неизбежные потери СОЖ положим как энтропию 1-го рода, а потери СОЖ при её замене как энтропию 2-го рода.

Проверим выполнение условий состоятельности выдвинутой гипотезы:

- 1) согласие с фактическим материалом для объяснения которого и была выдвинута гипотеза, что и будет представлено ниже;
- 2) принципиальная проверяемость гипотезы;
- 3) максимальная общность и прилагательность к широкому кругу технологических ситуаций (ТС) ЦСФ в исследуемом комплексе;
- 4) принципиальная простота гипотезы, состоящая в её способности при относительно немногих основаниях объединить широкий круг явлений в комплексе ЦСФ.

Возникающий основной вопрос – отражает ли варьирование объёма энтропии 1-го рода эффективность функционирования СОЖ и технологическую эффективность производства и связана ли она с энтропией 2-го рода при замене СОЖ?

Цель проведённых исследований

Цель проведённых исследований заключалась в подтверждении возможности использования скорости энтропии СОЖ 1-го рода при функционировании последней в качестве индикатора состояния процесса металлообработки и критерия оценки эффективности функционирования вложенной системы «СОЖ – система сопровождения – технологическая система», а также для выявления взаимосвязи с энтропией 2-го рода.

В качестве объекта исследований был избран комплекс ЦСФ водных СОЖ. Обоснован выбор тем, что:

а) комплекс работал длительное время и продолжает работать в текущем режиме 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) исследования проводились конкретно в определенной технологической ситуации, при этом учитывались особенности объекта и специфические условия его существования;

д) при исследованиях анализировали генезис создания комплексов ЦСФ СОЖ и их изменения.

Методика исследований

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

На начальном этапе осуществляли анализ накопленной информации об исследуемом комплексе ЦСФ и проводили первичную систематизацию полученных значений о потерях, т. е. энтропии СОЖ. На их основе получены проявления ситуации 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.

Результаты исследований входили и в другие процедуры: сравнение, измерение и «пассивный» эксперимент.

Анализ результатов исследований на комплексе ЦСФ показал, что они соответствовали требованиям:

– преднамеренности и целенаправленности, поскольку потребовали создания на предприятии специальной группы из сотрудников производств, по существу являющихся инженерами-«наладчиками» ЦСФ, нацеленной на экономию СОЖ как одного из основных ресурсов производства;

– планомерности, поскольку исследования проводились по временному графику;

– систематичности, поскольку результаты наблюдений регулярно обсуждались на совещаниях разного уровня.

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 на 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, произ-

водительность ЦСФ, объем емкостей для СОЖ, число оборотов СОЖ в единицу времени при ее циркуляции $n'_{цо}$, число коррекций потери объемов и число их замен.

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

Упрощенная гидравлическая схема ЦСФ представлена на рис. 1.

При исследованиях регистрировали основные показатели процесса функционирования СОЖ, «вложенной» в систему сопровождения и в технологическую систему для выявления при анализе взаимосвязи данных показателей в совокупности с показателями энтропий 1-го и 2-го рода.

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

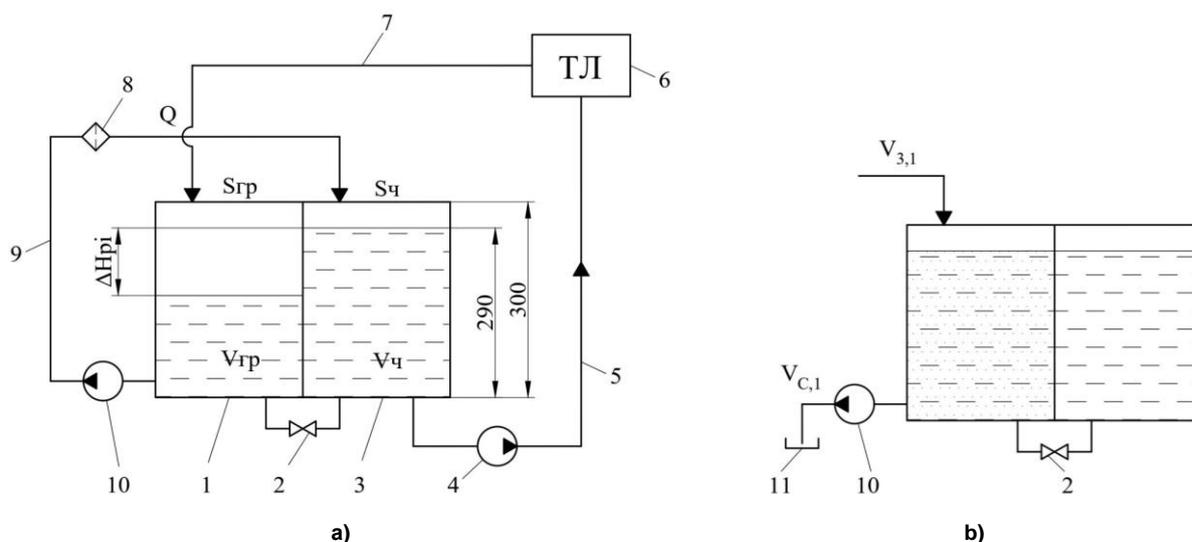


Рис. 1. Упрощенная гидравлическая схема ЦСФ: 1 – грязевой отсек; 2 – задвижка; 3 – чистовой отсек; 4, 10 – насос; 5, 9 – трубопровод; 6 – технологическая линия (ТЛ); 7 – лоток сбрасывания отработанной СОЖ; 8 – фильтровальная установка; 11 – промежуточная емкость

Fig. 1. Simplified hydraulic diagram of centralized operating systems: 1 – mud compartment; 2 – valve; 3 – finishing compartment; 4, 10 – pump; 5, 9 – pipeline; 6 – process line; 7 – tray for discharge of used lubricating cooling liquid; 8 – filter unit; 11 – intermediate tank

ЦСП работает следующим образом (рис. 1а): очищенная СОЖ из чистового отсека 3 емкости объемом $V_ч$ насосом 4 подается по трубопроводу 5 на технологическую линию (ТЛ); отработанная СОЖ по лотку 7 сбрасывается в грязевой отсек 1 емкости, в котором металлическая стружка оседает на дно. Очищенная СОЖ насосом 10 по трубопроводу 9 подается на фильтровальную установку 8, из которой сбрасывается по самотечному трубопроводу или лотку в чистовой отсек. При этом задвижка 2 закрыта.

На рис. 1б упрощенно показана настройка гидравлической схемы той же ЦСП, обеспечивающая сброс отработанной СОЖ при ее замене. Задвижка 2 открыта и насос 10 обеспечивает сброс СОЖ в промежуточную емкость 11. Периодически по графику СОЖ из промежуточной емкости порциями подается на разложение и утилизацию.

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.

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 возможны выработка принципа систематизации потерь ЦСФ, формирование цифровых двойников, выявление индикатора, позволяющего разработать процедуры оценки, контроля потерь и мониторинга состояния СОЖ в ЦСФ, обоснования решения для предотвращения сбоя в эксплуатации СОЖ, приводящего к незапланированной замене СиПС СОЖ и остановке производств.

Состав комплекса и основные показатели состава СОЖ и ЦСФ, входящих в комплекс, представлены в табл. 1.

Особенность табл. 1 заключалась в том, что все ЦСФ разбивались на группы по принципу единства качественных показателей ТС, а внутри групп – по величине скорости энтропии 1-го рода v_1 . В верхней диаграмме представлены значения числа замен СОЖ по ЦСФ и для групп ЦСФ.

Результаты исследований

Результаты исследований, подвергнутые статистической обработке, представленные в виде средних арифметических величин показателей контроля, показаны в табл. 1, 2.

Основные уравнения, используемые при обработке опытной информации, представлены ниже.

Объем коррекций в период между заменами

$$V_{кз} = v' \cdot n'_{цо} \cdot T_3; V_{кз} = v' \cdot [N_{цз}],$$

где $V_{кз}$ – объем коррекций в период между заменами СОЖ, м³; v' – скорость распределенных потерь, м³/ч; $n'_{цо}$ – число циклов оборотов в час, 1/ч; T_3 – период времени между заменами СОЖ, ч/г; $[N_{цз}]$ – ограничение числа цикла оборота СОЖ в период времени между заменами СОЖ, цикл.

Число оборотов СОЖ в период между заменами

$$V_{кз}/v' = n'_{цо} \cdot T_3.$$

Число циклов коррекции между заменами СОЖ

$$[N_{цз}] = \frac{n'_{цо} \cdot T_г}{n_3}, n_3 - \text{число замен, 1/г.}$$

Период времени между заменами СОЖ

$$T_3 = \frac{V_{кг}}{n_3 \cdot v' \cdot n'_{цо}}; T_3 = \frac{[N_{цз}]}{n'_{цо}},$$

где $V_{кг}$ – объем коррекций годовой, м³.

Число замен в год

$$n_3 = \frac{n'_{цо} \cdot T_г}{[N_{цз}]}; n_3 = \frac{T_г}{T_3},$$

где $T_г$ – период времени годовой, ч.

В ходе исследований использовали следующие показатели:

конструктивно-технологические:

– производительность Q , м³/ч;

– объём бака установки с учётом уменьшения высоты ёмкости с 3 до 2,85 м, V_0 , м³;

– концентрация СОЖ, α , %;

эксплуатационные:

– годовое число замен n_3 , 1/г;

– объём замены СОЖ в баке ЦСФ $V_3 = V_0$, м³;

– масса концентрата в объёме замены

$$M_3 = \alpha \cdot V_3, \text{ т;} \tag{1}$$

– годовой объём коррекции СОЖ $V_{кг}$, м³;

$$V_{кг} = V_{э1},$$

где $V_{э1}$ – объём энтропии СОЖ 1-го рода, м³;

– масса энтропии концентрата при замене СОЖ

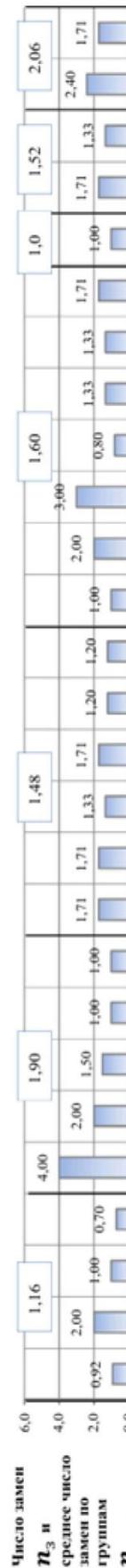
$$M_{кг} = V_{кг} \cdot \alpha; \tag{2}$$

Таблица 1
Table 1

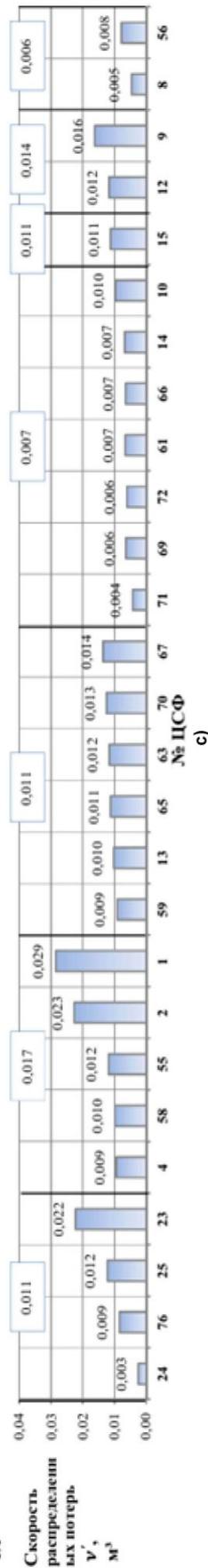
Технологические условия эксплуатации (а) и число замен СИПС СОЖ (b) на комплексе ЦСФ
Technological operating conditions (a) and the number of replacements of lubricating coolant (b) in a complex of centralized functioning systems

Вид обработки	Технологическая ситуация																	
	Л				Ш				Л				Ш					
Материал заготовки	АЛ				Ч				Ст				Ч					
Состав СОЖ	См				205				46				См					
Все операции лезвийной и абразивной обработки согласно т/процессам на автоматических линиях	180	720	1080	720	180	720	1080	720	180	720	1080	720	180	720	1080	720	180	720
Производительность Q, м³/ч	34	130	165	130	165	167	167	130	75	165	165	130	75	165	167	130	75	167
Объем бака Уб, м³	5,63	5,80	6,98	6,02	6,40	4,65	4,59	5,99	5,17	4,59	5,02	4,06	3,64	5,05	5,86	5,82	5,14	5,16
Число циклов обработки в час в'ц/ч	11,5	10,6	8,28	8,62	4,73	4,32	2,91	5,06	3,58	4,29	2,82	4,13	3,39	4,59	4,11	3,67	3,75	3,46
Концентрация вг/г	0,003	0,009	0,012	0,022	0,009	0,010	0,012	0,023	0,029	0,009	0,010	0,011	0,012	0,013	0,014	0,014	0,006	0,007
Скорость распределенных потерь у'	0,003	0,009	0,012	0,022	0,009	0,010	0,012	0,023	0,029	0,009	0,010	0,011	0,012	0,013	0,014	0,014	0,006	0,007
Число замен	1,16	1,90	1,48	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
среднее число замен по группам	2,00	1,50	2,00	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71
И/г	0,003	0,009	0,012	0,022	0,009	0,010	0,012	0,023	0,029	0,009	0,010	0,011	0,012	0,013	0,014	0,014	0,006	0,007

а)



б)



Обозначение: Л – лезвийная обработка; Ш – шлифование; АЛ – алюминий сплав; Ст – сталь; Ч – чугун; См – смесь СОЖ (205 и 46)

Таблица 2

Варьирование параметров распределения $\psi_p, n_3, \Delta \bar{H}_{pi}, \Delta V_{pi}, \Delta \bar{T}_i, \bar{v}_i, \sigma_{vi}, CV_i$ в сопоставлении с условиями механообработки по группам ЦСФ комплекса

Table 2

Variation of distribution parameters $\psi_p, n_3, \Delta \bar{H}_{pi}, \Delta V_{pi}, \Delta \bar{T}_i, \bar{v}_i, \sigma_{vi}, CV_i$ in comparison with the conditions of mechanical processing by groups of the centralized systems of functioning complex

Группа	i	ЦСФ №	S _Б м ²	ψ_p усл.ед	n ₃ 1/Г	Параметры временного ряда						Состав СОЖ	Материал заготовки	Вид обработки
						$\Delta \bar{H}_{pi}$ см	ΔV_{pi} м ³	$\Delta \bar{T}_i$ ч	\bar{v}_i м ³ /ч	σ_{vi} м ³ /ч	CV			
1	1	73	38									205/46	АЛ	Л
	2	76	43,3	0,646	2,0	13,65	5,92	59	0,121	0,026	0,215			
	3	23	43,3	0,671	0,7	57,32	24,84	91	0,266	0,066	0,248			
	4	25	55	0,678	0,98	42,94	23,62	110	0,217	0,074	0,341			
	5	24	11,3	0,687	0,92	37,58	4,26	121	0,036	0,005	0,139			
				0,670	1,15	37,9	14,7	95,3	0,160	0,043	0,236			
2	6	3	43,3									205	Ч	Л
	7	55	50	0,520	1,5	49,77	24,89	178	0,15	0,051	0,340			
	8	58	50	0,520	2,0	41,43	20,72	179	0,122	0,065	0,533			
	9	4	60	0,668	4,0	47,05	28,23	171	0,192	0,159	0,828			
	10	2	55	0,815	1,0	42,3	23,27	88	0,275	0,081	0,295			
	11	1	55,7	0,871	1,0	42,36	23,58	71	0,357	0,112	0,314			
				0,679	1,9	44,6	24,1	137,4	0,219	0,094	0,462			
3	12	59	43,3	0,441	1,71	50,79	22,01	197	0,123	0,071	0,577	205	Ст	Л
	13	63	50	0,520	1,71	13,82	6,91	52	0,148	0,029	0,196			
	14	67	35	0,677	1,2	40,57	14,20	109	0,126	0,046	0,365			
	15	65	55	0,680	1,33	25,29	13,91	107	0,153	0,034	0,222			
	16	70	31,7	0,726	1,2	43,87	13,89	121	0,115	0,043	0,374			
	17	13	25	0,759	1,71	51,62	12,91	110	0,121	0,034	0,281			
				0,634	1,48	37,7	14,0	116	0,131	0,043	0,336			
4	18	66	25	0,545	1,33	42,88	10,72	144	0,078	0,029	0,372	205	Ст	Ш
	19	71	12,7	0,616	1,0	38,65	4,90	101	0,051	0,013	0,255			
	20	61	25	0,634	0,8	43,46	10,87	144	0,079	0,016	0,203			
	21	14	25	0,759	1,33	48,8	12,20	156	0,081	0,01	0,123			
	22	10	25	0,759	1,71	47,43	11,86	107	0,118	0,059	0,500			
	23	69	22	0,788	2,0	56	12,32	124	0,106	0,04	0,377			
	24	72	22	0,788	3,0	45,71	10,06	107	0,1	0,075	0,750			
				0,698	1,6	46,1	10,4	126,1	0,088	0,035	0,369			
5	25	15	55,7	0,587	1,0	57,8	32,2	162	0,226	0,119	0,527	46	Ст	Л
				0,587	1,0	57,8	32,2	162	0,226	0,119	0,527			
6	26	12	60	0,689	1,71	42,53	25,52	125	0,218	0,082	0,376	205/46	Ст	Л
	27	9	43,3	0,774	1,33	44,47	19,27	98	0,199	0,063	0,317			
				0,732	1,52	43,5	22,4	111,5	0,209	0,073	0,346			
7	28	56	25	0,759	1,71	40,15	10,04	113	0,09	0,03	0,333	205	Ч	Ш
	29	8	22	0,788	2,1	46,92	10,32	144	0,071	0,017	0,239			
				0,773	2,06	43,5	10,2	128,5	0,081	0,024	0,286			
Всего														
	Σ	1108	0,409	42,3	1155	433	3289	3,94	1,45	9,64				
	Ср	38,20	0,646	1,57	42,78	16,1	121,8	0,15	0,05	0,36				

– средняя скорость энтропии СОЖ

$$v_{э1} = \frac{V_{кг}}{T_{г}}, \text{ м}^3/\text{ч},$$

где $T_{г} = 4200$ – годовой расчётный фонд времени, ч;

– средний период времени между коррекциями СОЖ $\Delta T_{к} = \Delta \bar{T}_l$, ч;

– объём коррекции

$$\Delta V_{к} = v_{э1} \cdot \Delta T_{к}, \text{ м}^3; \quad (3)$$

– годовой объём недоливов СОЖ при последней коррекции перед заменой

$$\Delta V_{кг} = \Delta T_{к} \cdot n_3, \text{ м}^3; \quad (4)$$

– годовой объём сбрасываем при замене СОЖ

$$V_{сг} = (V_3 \cdot \Delta V)_{к} \cdot n_3, \text{ м}^3; V_{сг} = V_{э2}, \quad (5)$$

где $V_{э2}$ – энтропия 2-го рода.

Масса концентрата, утрачиваемая вместе с СОЖ при эксплуатации и при залповом сбросе при замене СОЖ:

$$M_{г} = M_{кг} + M_{сг} = (V_{кг} + V_{сг}) \cdot \alpha, \text{ т}, \quad (6)$$

$$M_{кг} = M_{э1}; M_{сг} = M_{э2}.$$

Годовой объём приготовления СОЖ, м^3 :

$$V_{пг} = V_{э1} + V_{э2} = (V_{кг} + V_{сг}) = V_{эг}. \quad (7)$$

Степень энтропии 1-го рода

$$\varepsilon_{э1} = V_{э1} \frac{1}{V_{пг}}. \quad (8)$$

Относительная степень энтропии СОЖ 1-го рода

$$\delta_V = \frac{V_{э1,гр} N}{V_{э1}}. \quad (9)$$

Относительная степень энтропии (к производительности)

$$\delta_Q = \frac{V_{э1}}{Q}, \text{ усл. ед.}, \quad (10)$$

годовая доля энтропии по группам

$$\kappa_{э1, гр} N = \frac{V_{э1,гр} N}{V_{э1}}, \quad (11)$$

$$\kappa_{э2, гр} N = \frac{V_{э2,гр} N}{V_{э2}}. \quad (11a)$$

Пример прогноза расхода ресурсов СОЖ, выполненный на основе энтропийного подхода, представлен в табл. 3.

На рис. 2 по группам табл. 3 представлены:

а) средние значения скорости энтропии по группам, $\text{м}^3/\text{г}$;

б) годовая энтропия объёма СОЖ по группам, $\text{м}^3/\text{г}$;

в) годовая энтропия объёма (1-го рода) по группам, $\text{м}^3/\text{г}$;

г) годовая энтропия (2-го рода) объёма СОЖ по группам.

При сопоставлении рис. 2а–д прослеживается наследственная структурная связь скорости энтропии и объёма энтропии. Это свидетельствует о том, что источником энтропии 2-го рода – потерь СОЖ при её замене – является потеря СОЖ при коррекции (энтропии 1-го рода), которая по существу определяется совершенством технологического процесса функционирования СОЖ. Энтропии 1-го рода и 2-го рода являются визитной карточкой каждой ЦСФ и могут служить критерием оценки эффективности функционирования СОЖ в системе его сопровождения при обслуживании конкретной технологической системой (ТС). То есть $v_{э1}$ и $v_{э2}$, $V_{э1}$ и $V_{э2}$, а также производственные от них $V_{пг}$ и степени $\varepsilon_{э1}$, δ_V , δ_Q , $\delta_{э1}$ и $\delta_{э2}$ являются основными технологическими характеристиками ЦСФ и ТС.

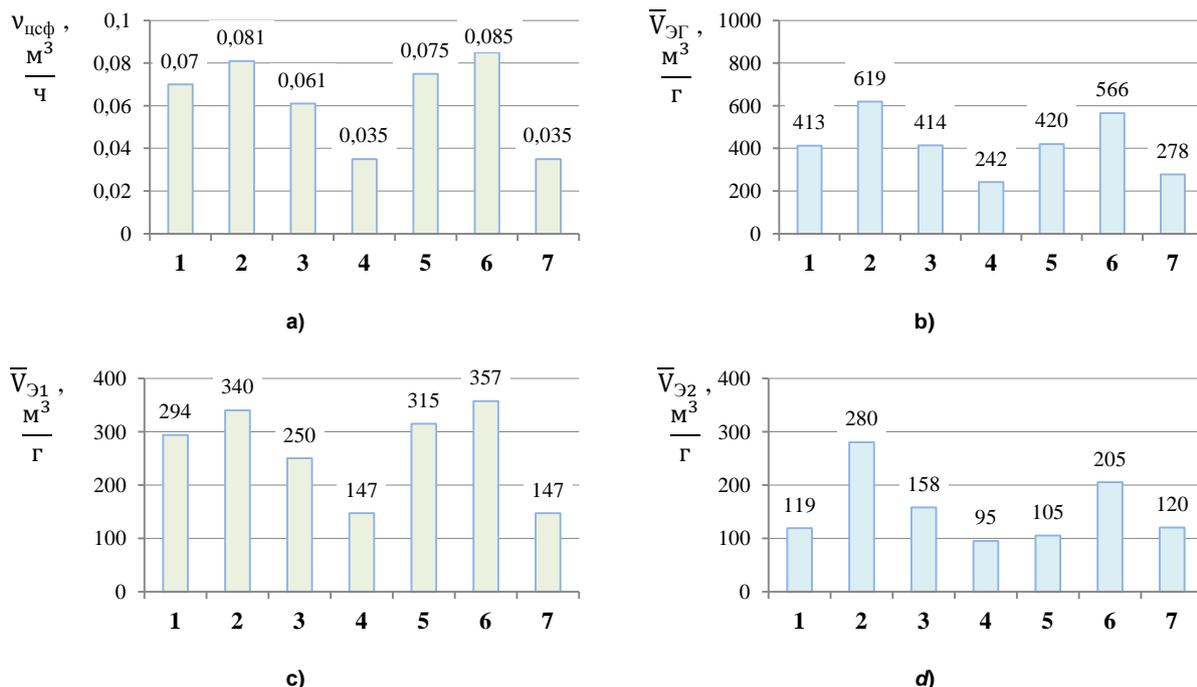


Рис. 2. Диаграмма скорости энтропии (а) и объема энтропии по группам (табл. 2):
а – $v_{цсф}$; б – $\bar{V}_{ЭГ}$; в – $\bar{V}_{Э1}$; д – $\bar{V}_{Э2}$
Fig. 2. Diagram of the rate of entropy (a) and the volume of entropy by groups (table 2):
а – $v_{цсф}$; б – $\bar{V}_{ЭГ}$; в – $\bar{V}_{Э1}$; д – $\bar{V}_{Э2}$

Таблица 3

Прогноз потерь (энтропии) СОЖ на основе нормативно-энтропийного расчета
с использованием опытных данных по группам ЦСФ

Table 3

Forecast of losses (entropy) of coolant based on normative-entropy calculation using experimental data
for groups of centralized systems of functioning

№ гр. ТС	ЦСФ	Q	V ₀	α	n'ц ₀	n _з	V _з	M _з	V _{КГ}	M _{КГ}	v _{Э1}	ΔT _К	ΔV	V _{СГ}	V _{ЭГ}	M _{ПГ}	κ
		M³/ч	M³	%	1/ч	1/г	M³	кг	M³	кг	M³/ч	ч	M³	M³	M³	кг	–
1	24	180	32	11,5	5,3	0,92	29,1	3,71	71,4	8,21	0,017	121	2,1	27	98,4	11,3	0,73
	76	720	123	10,6	5,8	2,00	110,7	13,04	218,4	23,15	0,052	59	3,1	108	326,0	34,6	0,67
	25	1080	157	8,3	6,55	1	141,1	13,01	344,4	28,59	0,082	110	9,0	132	476,5	39,5	0,72
	23	720	124	8,6	6,02	0,7	111,6	10,66	294	25,28	0,070	91	6,4	105	399,2	34,3	0,74
	Ср.	675	109	9,75	5,92	1,16	98,1	10,1	232	21,3	0,055	95,3	5,1	93	325,0	29,9	0,71
	2	4	1080	171	4,7	6,4	4	153,9	8,04	239,4	11,25	0,057	171	9,7	144	383,6	18,0
58		720	142,5	4,3	5,13	2	128,3	6,13	214,2	9,21	0,051	179	9,1	119	333,3	333,3	0,64
55		720	142,5	2,9	5,16	2	128,3	4,13	252	7,31	0,06	178	10,7	118	369,6	10,7	0,68
2		720	157	5,1	6,02	1	141,3	8,01	441	22,49	0,105	88	9,2	132	585,2	29,8	0,75
1		720	159	3,6	4,59	1	143,1	5,72	71,4	2,57	0,132	71	9,4	134	190,5	6,9	0,37
Ср.		792	154,4	4,12	5,46	2	139,0	6,41	244	10,6	0,081	137,4	9,6	129,3	372,4	79,8	0,62

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
3	59	720	123,5	4,3	5,99	1,71	111,2	5,31	218,4	9,39	0,052	107	5,6	106	324,0	13,9	0,67
	13	360	71,3	2,8	5,17	1,71	64,2	2,00	210	5,88	0,05	110	5,5	59	268,7	7,5	0,78
	65	720	156,8	4,1	4,59	1,33	141,1	6,43	214,2	8,78	0,051	107	5,5	136	349,9	14,3	0,61
	63	720	142,5	3,4	5,02	1,71	128,3	4,85	256,2	8,71	0,061	109	6,6	122	377,8	12,8	0,68
	70	360	90	4,6	4,06	1,2	81,0	4,14	432,6	19,90	0,103	121	12,5	68,5	501,1	23,1	0,86
	67	360	100	4,1	3,64	1,2	90,0	4,10	210	8,61	0,05	109	5,5	85	294,6	12,1	0,71
	Ср.	540	114	3,88	4,75	1,48	102,6	4,47	257	10,21	0,06	110,5	6,8	95,8	352,7	14,0	0,72
4	71	180	36	3,7	5,08	1	32,4	1,37	84	3,19	0,020	101	2,0	30,4	114,4	11,4	0,73
	69	360	62,7	3,8	5,86	2,00	56,4	2,38	142,8	5,43	0,034	124	4,2	52	195,0	13,0	0,73
	72	360	62,7	3,8	5,82	3,00	56,4	2,19	138,6	4,85	0,033	107	3,5	53	191,5	4,3	0,72
	61	360	71,3	3,5	5,14	0,8	64,2	2,28	315	10,08	0,075	144	10,8	53,4	368,4	7,4	0,86
	66	360	71,3	3,2	5,14	1,33	64,2	2,21	147	4,56	0,035	144	5,0	206	353,1	6,7	0,42
	14	360	71,3	3,1	5,16	1,33	64,2	2,21	147	4,56	0,035	156	5,5	59	205,7	11,8	0,71
	10	360	71,3	3,0	5,16	1,71	64,2	2,14	210	6,30	0,05	107	5,4	59	268,8	10,9	0,78
	Ср.	334	63,80	3,44	5,34	1,60	57,4	2,11	169	5,57	0,04	126,1	5,2	73,2	242,4	9,4	0,71
5	15	1080	158,3	9,2	6,96	1	142,5	14,56	315	28,98	0,075	162	12,2	130,3	445,3	41,0	0,71
6	12	363	74,3	6	8,16	4,71	66,9	4,46	319,2	19,15	0,075	110	8,3	102,0	421,2	25,3	0,76
	9	720	123	7,8	5,95	1,33	110,7	9,59	315	24,57	0,075	98	7,4	103,4	418,4	32,6	0,75
	Ср.	541,5	98,7	6,90	7,06	3,02	88,8	7,03	317	21,86	0,075	104,0	7,8	102,7	419,8	29,0	0,76
7	8	360	62,7	3,6	5,82	2,4	56,4	2,26	121,8	4,38	0,029	144	4,2	52	174,1	6,3	0,70
	56	360	71,3	2,4	5,13	1,71	64,2	1,71	168	4,03	0,04	113	4,5	60	227,7	5,5	0,74
	Ср.	360	67	3	5,48	2,06	60,3	1,98	145	4,21	0,03	128,5	4,3	56	200,9	5,9	0,72
	Σ	15123	2828	136	149	45,3	2546	147	6111	319	1,57	3241	183	2554	8662	779	18,9
	Ср.	560,1	104,8	5,04	5,51	1,68	94,3	5,43	226,3	11,8	0,06	120	6,76	94,6	321	28,8	0,70

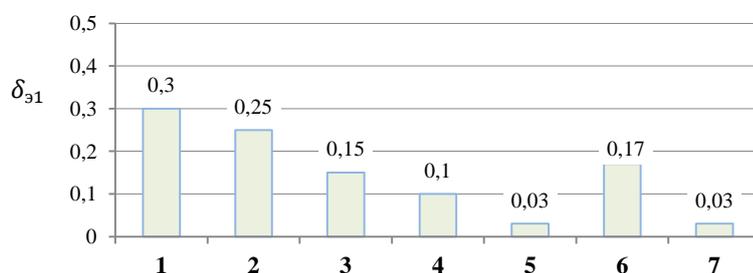
На рис. 3 средние значения относительной по Q скорости энтропии 1-го рода по группам ЦСФ сопоставляются с качественными показателями групп, характеризующими технологическую ситуацию для группы ЦСФ (см. табл. 3). Самая большая энтропия наблюдается для ТС1 при лезвийной обработке заготовок деталей из алюминиевых сплавов в среде гибридной СОЖ при концентрации 9,8 %. Большие значения δ_{31} для первой группы обусловлены высокими значениями производительности оборудования и высокой адсорбционной активностью поверхности заготовок из алюминиевых сплавов.

При функционировании синтетической СОЖ при лезвийной обработке чугунных заготовок значение δ_{31} снижается в 1,25 раза по сравнению со значением δ_{31} для заготовок из алюминиевых сплавов. Однако высокая адсорбционная активность поверхности стружки скалывания и повышенные припуски на обработку, характерные для чугунов, способствует превышению величины δ_{31} для прочих групп. При лезвийной обработке заготовок из стали (ТС3) в 2 раза меньше, чем тот же показатель для алюминиевых заготовок. При обработке шлифованием стальных заготовок в среде синтетической СОЖ из-за значительно меньшей удельной поверхности стружки δ_{31} в 3 раза меньше по сравнению с δ_{31} для ТС1 (заготовки из алюминиевых сплавов). При лез-

вийной обработке стальных заготовок в среде полусинтетической СОЖ (группа ТС 5) наблюдаются низкие значения $\delta_{\varepsilon 1}$, близкие к значениям $\delta_{\varepsilon 1}$ для седьмой группы ТС при обработке чугуновых заготовок шлифованием в среде синтетической СОЖ. Для шестой группы при лезвийной обработке стальных заготовок $\delta_{\varepsilon 1}$ близок к этому показателю для 3-й группы (в обоих случаях наблюдается один вид обработки – шлифование).

Группа №						
1	2	3	4	5	6	7
Материал						
АЛ	Ч	СТ			Ч	
Вид обработки						
Л		Ш		Л		Ш
СОЖ						
ГЖ	СЖ		ПСЖ		ГЖ	СЖ

а)



б)

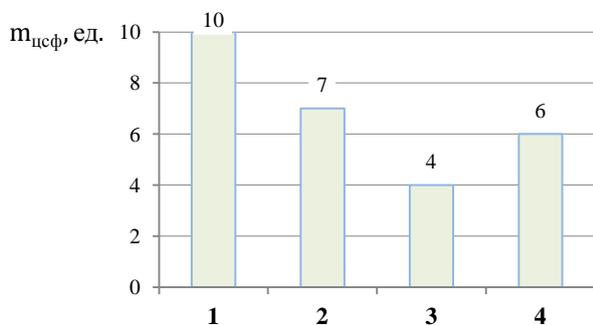
Рис. 3. Сопоставление скорости энтропии 1-го рода с качественными показателями ТС
Fig. 3. Comparison of the entropy rate of the 1st kind with the qualitative indicators of the TE

Таким образом, полученные значения энтропии 1-го порядка соответствуют представлениям о технологических ситуациях и имеют логические и простые объяснения.

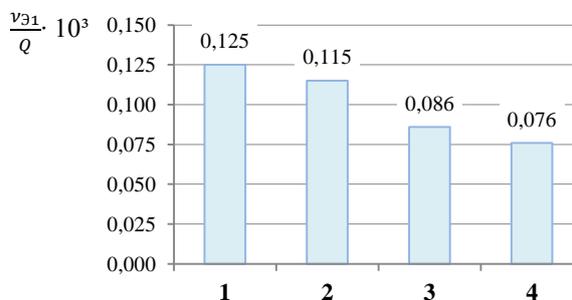
Авторами была предпринята попытка использования при исследованиях с группированием ЦСФ по группам со значениями $\varepsilon_{\varepsilon 1}$: 1 – 0,7...0,8; 2 > 0,8; 3 > 0,5...0,7; 4 < 0,5.

На рис. 4а на диаграмме показано число $m_{\text{цсф}}$ в группах. Наблюдается распределение числа ЦСФ по группам: 1-я группа – 0,37; 2-я группа – 0,26; 3-я группа – 0,15 и 4-я группа – 0,22. Эта информация позволяет технически обоснованно проектировать централизованные системы сопровождения функционирования СОЖ на Заводе двигателей ПАО «КАМАЗ».

На рис. 4б показаны значения $\varepsilon_{\varepsilon 1}$ для групп: 1 – 0,126; 2 – 0,115; 3 – 0,086; 4 – 0,076. То есть по мере уменьшения величины энтропии 1-го рода для группы снижается и степень её относительного количества.



а)



б)

Рис. 4. Число ЦСФ $m_{\text{цсф}}$ в группах с различной $\varepsilon_{\varepsilon 1}$ (а) и относительной величиной $\frac{v_{\varepsilon 1}}{Q}$ (б)

Fig. 4. The number of centralized systems of functioning $m_{\text{цсф}}$ of functioning in groups with different $\varepsilon_{\varepsilon 1}$ (а) and relative values of $\frac{v_{\varepsilon 1}}{Q}$ (б)

На рис. 4а показаны средние значения по группам показателей Q , на рис. 4б – V_3 . Хорошо прослеживается наследственность значений $\varepsilon_{э1}$, $\delta_{э1}$ и $n_э$ по значениям $v_{э1}$. Вывод о взаимосвязи энтропии 1-го и 2-го рода, сделанный нами выше, подтверждается.

Выводы

1. Функционирование СОЖ сопровождается потерями: неизбежными и распределенными в объеме структуры централизованной системы сопровождения и времени (энтропия 1-го рода) и одномоментными потерями при замене всего объема в системе (энтропия 2-го рода).
2. Энтропии 1-го рода и 2-го рода связаны между собой. Значение энтропии 1-го рода варьируется в интервале 0,003–0,029 м³ за один цикл оборота при циркуляции, значение энтропии 2-го рода – 3569 м³ при варьировании числа замен 0,7–4 раза в год.
3. Величина энтропии 1-го рода обусловлена значением скорости энтропии. Средние значения потерь СОЖ за один оборот связаны с составом СОЖ и структурами централизованной системы сопровождения функционирования СОЖ и технологической системы.
4. Значение энтропии 1-го рода зависит от технологической ситуации. Распределение средних значений скорости энтропии определяет распределение годовых объемов совокупной энтропии и энтропий 1-го и 2-го рода.
5. Энтропия СОЖ определяет варьирование состава СОЖ и предопределяет экологичность её функционирования.

Список литературы

1. Бабаев Э.Р. Смазочно-охлаждающие жидкости: свойства и методы применения // Башкирский химический журнал. 2022. Т. 29, № 3. С. 11–19. DOI: 10.17122/bcj-2022-3-11-19.
2. Kilinkarslan E., Kilinkarslan S.K., Cetin M.H. Evaluation of pure nanocutting fluid taking into account tribological characteristics and cost parameters // Tribology International. 2021. Vol. 157. P. 106916.
3. Горбачев Д.А., Маслов И.Н. Синтетическая охлаждающая жидкость // Мировые естественно-научные исследования современности. Технический прогресс: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф., Ростов-на-Дону, 31 мая 2023 г. / АНО «НИИ ДПО». Ростов н/Д: ООО Изд-во «Манускрипт», 2023. С. 175–177.
4. Булыжев Е. М., Худобин Л. В., Алякин Ю. Б. Повышение срока эксплуатации синтетических и полусинтетических смазочно-охлаждающих жидкостей в централизованных системах применения при механической обработке заготовок деталей // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 4 (60). С. 19–26. DOI: 10.18324/2077-5415-2023-4-19-26.
5. Долгов В.А., Кабанов А.А. Основные подходы к формированию информационной модели производственно-технологической системы машиностроительного предприятия // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72, № 4. С. 178–184.
6. 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. Vol. 29. P. e00301.
7. Математическое моделирование и исследование технологии и техники применения смазочно-охлаждающих жидкостей в машиностроении и металлургии / Е.М. Булыжев, А.Ю. Богданов, В.В. Богданов и др. Ульяновск: УлГТУ, 2001. С. 49–57.
8. Пыдрин А. В., Пикина А.М., Наджи Н.А.Ф., Голубев М.И. Влияние состава смазывающе-охлаждающей жидкости на шероховатость и коррозионную стойкость поверхности деталей после механической обработки // Техника и оборудование для села. 2020. № 10 (280). С. 28–31. DOI: 10.33267/2072-9642-2020-10-28-31.
9. Ba S., Sa N., Chakradharb D. Effect of working parameters on the surface integrity in cryogenic diamond burnishing of 17-4 PH stainless steel with a novel diamond burnishing tool // Journal of Manufacturing Processes. 2019. Vol. 38. P. 564–571.
10. Ba S., Sa N., Chakradharb D. Sustainable diamond burnishing of 17-4 PH stainless steel for enhanced surface integrity and product performance by using a novel modified tool // Materials Research Express. 2019. Vol. 6. P. 14.
11. Baldin V., Ribeiro da Silva L.R., Gelamo R.V. et al. Influence of Graphene Nanosheets on Thermo-Physical and Tribological Properties of Sustainable Cutting Fluids for MQL Application in Ma-

chining Processes // Research Square. 2021. URL: <https://www.researchsquare.com/article/rs-838748/v1> (дата обращения: 13.06.2023).

12. Bhuyan M., Sarmah A., Gajrani K.K. et al. State of Art on Minimum Quantity Lubrication in Grinding Process // Materials Today: Proceedings. 2018. Vol. 5, no. 9. P. 19638–19647.

13. Boswell B., Islam M.N., Davies I.J. et al. A review identifying the effectiveness of minimum quantity lubrication (MQL) during conventional machining // Curtin University. 2022. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-017-0142-3> (дата обращения: 22.04.2022).

14. Cetin M.H., Ozcelik B., Kuram E., Demirbas E. Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method // Journal of Cleaner Production. 2011. Vol. 19, no. 17–18. P. 2049–2056. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.07.013.

15. Challen J.M., McLean L.J., Oxley P.L.B. Plastic deformation of a metal surface in sliding contact with a hard wedge: its relation to friction and wear // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 1984. P. 161–181.

16. Cui X., Li C., Ding W. et al. Minimum quantity lubrication machining of aeronautical materials using carbon group nanolubricant: From mechanisms to application // Chinese Journal of Aeronautics. 2022. Vol. 35. P. 85–112.

17. Савельев А.В., Бобровский Н.М. Прогресс и тренды сухой обработки поверхности деталей машин применительно к технологии поверхностно-пластического деформирования путём выглаживания // СТИН. 2024. № 1. С. 13–16.

18. Савельев А.В., Бобровский Н.М., Шенбергер П.Н. Совершенствование способов повышения эффективности и экологичности технологии поверхностного пластического деформирования с применением минимального количества СОЖ // Динамика систем, механизмов и машин. 2024. Т. 12, № 2. С. 44–50. DOI: 10.25206/2310-9793-2024-12-2-44-50.

19. Saveliev A. Model of surface plastic deformation technology without coolant application developed based on the use of the Ansys information system and experiment // Hybrid Methods of Modeling and Optimization in Complex Systems (HMMOCS-II-2023): Proceedings of the II International Workshop, Krasnoyarsk, 28–30 ноября 2023 года. Vol. 59. Krasnoyarsk: EDP Sciences, 2024. P. 1014. DOI: 10.1051/itmconf/20245901014.

20. Alaba E.S., Kazeem R.A., Adebayo A.S. et al. Evaluation of palm kernel oil as cutting lubricant in turning AISI 1039 steel using Taguchi-grey relational analysis optimization technique // Advances in Industrial and Manufacturing Engineering. 2023. Vol. 6. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666912923000041?via%3Dihub> (дата обращения: 15.06.2023).

21. Amini S., Khakbaz H., Barani A. Improvement of Near-Dry Machining and Its Effect on Tool Wear in Turning of AISI 4142 // Materials and Manufacturing Processes. 2015. Vol. 30. P. 241–247.

22. Astakhov V.P. Ecological Machining: Near-dry Machining // Machining. Springer, London, 2008. P. 195–223. DOI: 10.1007/978-1-84800-213-5_7.

23. Технология обработки деталей поверхностно-пластическим деформированием без применения смазывающе-охлаждающих технологических средств: монография / Н.М. Бобровский, П.А. Мельников, И.Н. Бобровский, А.В. Ежелев. Самара: Самарский научный центр РАН, 2012. 141 с.

References

1. Babaev E.R. Cutting fluids: properties and application methods. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal*. 2022;29(3):11–19. (In Russ.) DOI: 10.17122/bcj-2022-3-11-19.

2. Kilinkarslan E., Kilinkarslan S.K., Cetin M.H. Evaluation of pure nanocutting fluid taking into account tribological characteristics and cost parameters. *Tribology International*. 2021;157:106916.

3. Gorbachev D.A., Maslov I.N. Synthetic cooling fluid. *Mirovye estestvenno-nauchnye issledovaniya sovremennosti. Tekhnicheskii progress*. Rostov-on-Don, 2023, pp. 175–77. (In Russ.)

4. Bulyzhev E.M., Khudobin L.V., Alyakin Yu.B. Extending the service life of synthetic and semi-synthetic cutting fluids in centralized application systems for machining workpieces. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2023;(4):19–26. (In Russ.) DOI: 10.18324/2077-5415-2023-4-19-26.

5. Dolgov V.A., Kabanov A.A. Key approaches to forming an information model of a production-technological system in a machine-building enterprise. *Avtomatizatsiya. Sovremennyye tekhnologii*. 2018;72(4):178–184. (In Russ.)
6. 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;29:e00301.
7. Bulyzhev E.M., Bogdanov A.Y.u, Bogdanov V.V. et al. *Matematicheskoe modelirovanie i issledovanie tekhnologii i tekhniki primeneniya smazochno-okhlazhdayushchikh zhidkosti v mashinostroenii i metallurgii* [Mathematical modeling and research of cutting fluid technology and equipment in mechanical engineering and metallurgy]. Ul'yanovsk, 2001, p. 49–57. ISBN: 5-89146-233-8.
8. Pydrin A.V., Pikina A.M., Nadzhi N.A.F., Golubev M.I. Influence of cutting fluid composition on surface roughness and corrosion resistance after machining. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2020;(10):28–31. (In Russ.) DOI: 10.33267/2072-9642-2020-10-28-31.
9. Ba S., Sa N., Chakradharb D. Effect of working parameters on the surface integrity in cryogenic diamond burnishing of 17-4 PH stainless steel with a novel diamond burnishing tool. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019;38:564–71.
10. Ba S., Sa N., Chakradharb D. Sustainable diamond burnishing of 17-4 PH stainless steel for enhanced surface integrity and product performance by using a novel modified tool. *Materials Research Express*. 2019;6:14.
11. Baldin V., Ribeiro da Silva L.R., Gelamo R.V., Iglesias A.B., Batista da Silva R., Khanna N., Machado A.R. Influence of Graphene Nanosheets on Thermo Physical and Tribological Properties of Sustainable Cutting Fluids for MQL Application in Machining Processes. *Research Square*, 2021. URL: <https://www.researchsquare.com/article/rs-838748/v1>. (accessed on June 13, 2023)
12. Bhuyan M., Sarmah A., Gajrani K.K., Pandey A., Thulkar T.G., Sankar M.R. State of Art on Minimum Quantity Lubrication in Grinding Process. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5(9):19638–19647.
13. Boswell B., Islam M.N., Davies I.J., Ginting Y.R., Ong A.K. A review identifying the effectiveness of minimum quantity lubrication (MQL) during conventional machining. *Curtin University*, 2022. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-017-0142-3>. (accessed on April 22, 2022)
14. Cetin M.H., Ozcelik B., Kuram E., Demirbas E. Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method. *Journal of Cleaner Production*. 2011;19(17–18):2049–56. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.07.013.
15. Challen J.M., McLean L.J., Oxley P.L.B. Plastic deformation of a metal surface in sliding contact with a hard wedge: its relation to friction and wear. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 1984:161–181.
16. Cui X., Li C., Ding W., Chen Y., Mao C., Xu X., Liu B., Wang D., Li H., Zhang Y., Said Z., Debnath S., Jamil M., Ali H.M., Sharma S. Minimum quantity lubrication machining of aeronautical materials using carbon group nanolubricant: From mechanisms to application. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2022;35:85–112.
17. Savel'ev A.V., Bobrovskii N.M. Progress and trends in dry surface machining of machine parts in relation to surface plastic deformation by burnishing. *STIN*. 2024;(1):13–16. (In Russ.)
18. Savel'ev A.V., Bobrovskii N.M., Shenberger P.N. Improving methods to enhance the efficiency and environmental friendliness of surface plastic deformation technology using minimal amounts of cutting fluids. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin*. 2024;12(2):44–50. (In Russ.) DOI: 10.25206/2310-9793-2024-12-2-44-50.
19. Savelyev A. Model of surface plastic deformation technology without coolant application developed based on the use of the Ansys information system and experiment. *Hybrid Methods of Modeling and Optimization in Complex Systems (HMMOCS II 2023)*. Proceedings of the II International Workshop, Krasnoyarsk, 28–30 November 2023. Vol. 59. Krasnoyarsk, 2024, p. 1014. DOI: 10.1051/itmconf/20245901014.
20. Alaba E.S., Kazeem R.A., Adebayo A.S., Petinrin, M.O., Ikumapayi O.M., Jen T.-C., Akinlabi E.T. Evaluation of palm kernel oil as cutting lubricant in turning AISI 1039 steel using Taguchi grey relational analysis optimization technique. *Adv. Ind. Manuf. Eng.* 2023, 6. URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666912923000041?via%3Dihub> (accessed on June 15, 2023).

21. Amini S., Khakbaz H., Barani A. Improvement of Near Dry Machining and Its Effect on Tool Wear in Turning of AISI 4142. *Mater. Manuf. Process.* 2015, 30, 241–247.

22. Astakhov V.P. Ecological Machining: Near-dry Machining. *Machining*. Springer, London, 2008, pp. 195–223. DOI: 10.1007/978-1-84800-213-5_7.

23. Bobrovsky N.M., Melnikov P.A., Bobrovsky I.N., Ezhelev, A.V. *Tekhnologiya obrabotki detaley poverkhnostno-plasticheskim deformirovaniem bez primeneniya smazyvayushche okhlazhd-yushchikh tekhnologicheskikh sredstv* [Technology of Processing Parts by Surface Plastic Deformation without the Use of Cutting and Cooling Technological Means]. Samara, 2012. 141 p.

Информация об авторах

Алякин Юрий Борисович, аспирант кафедры физического материаловедения, Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия; kontro73@yandex.ru

Бульжев Евгений Михайлович, доцент, доктор технических наук, профессор кафедры «Инновационные технологии в машиностроении», Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия; eugbul1946@gmail.com

Тронин Вадим Георгиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные системы», Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия; vadimgt77@gmail.com

Золотов Александр Максимович, профессор, доктор технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Технология и исследование материалов», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия; a_zolotov@mail.spbstu.ru

Скуратов Дмитрий Леонидович, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии производства двигателей», Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева, Самара, Россия; skuratov@ssau.ru

Information about the authors

Yuri B. Alyakin, PhD student, Department of Physical Materials Science, Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia; kontro73@yandex.ru

Evgeny M. Bulyzhev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of “Innovative Technologies in Mechanical Engineering, Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia; eugbul1946@gmail.com

Vadim G. Tronin, Candidate of Technical Sciences (PhD equivalent), Associate Professor, Department of “Information Systems”, Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia; vadimgt77@gmail.com

Alexander M. Zolotov, Professor, Doctor of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Department of “Technology and Materials Research”, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; St. Petersburg, Russia; a_zolotov@mail.spbstu.ru

Dmitry Leonidovich Skuratov, Professor, Doctor of Technical Sciences; Professor, Department of “Engine Production Technologies”, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia; skuratov@ssau.ru

Статья поступила в редакцию 20.10.2025; принята к публикации 20.11.2025

The article was submitted 20.10.2025; accepted for publication 20.11.2025