

УДК 621.895

**В. В. Новиков<sup>1</sup>, С. А. Сырбу<sup>1</sup>, Е. Е. Нуждина<sup>1</sup>, М. С. Маршалов<sup>2</sup>, Р. Ю. Лисицын<sup>2</sup>**

**ОБ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕЗОГЕННЫХ ПРИСАДОК  
В СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВАХ**

<sup>1</sup>Ивановский государственный университет,  
ул. Ермака, 39, 153025 Иваново, Россия. E-mail: novikov-ww@mail.ru

<sup>2</sup>Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,  
пр. Строителей, 33, 153040 Иваново, Россия

*Целью работы являлась оптимизация состава СОТС для операции сверления и резьбонарезания конструкционных сталей за счет мезогенных соединений холестерина. Изложены принципы оптимизации. Результаты экспериментов показали, что при приготовлении СОТС на базе минерального масла с присадками МСХ наилучшие рабочие свойства СОТС достигаются при оптимальной концентрации присадок около 3...4 мас. %. Для материалов с более высокой твердостью можно рекомендовать составы с повышенным содержанием присадок, имеющих температуру существования мезоморфной фазы свыше 100 °С.*

**Ключевые слова:** присадки, жидкие кристаллы, мезогенные соединения холестерина, металлообработка, смазочно-охлаждающие технологические средства.

**V. V. Novikov<sup>1</sup>, S. A. Syrbu<sup>1</sup>, E. E. Nuzhdina<sup>1</sup>, M. S. Marshalov<sup>2</sup>, R. Yu. Lisitsyn<sup>2</sup>**

**ABOUT OPTIMAL CONCENTRATION OF MESOGENIC ADDITIVES  
IN METALWORKING FLUIDS**

<sup>1</sup>Ivanovo State University  
Ermak str., 39, 153025 Ivanovo, Russia. E-mail: novikov-ww@mail.ru

<sup>2</sup>Ivanovo Institute of the State Firefighting Service,  
Stroiteley Ave, 33, 153025 Ivanovo, Russia

*The purpose of the research is the optimization of the metalworking fluids (MWF) composition for drilling and threading of structural steels by the inclusion of cholesterol mesogenic compounds into the composition. Principles of the optimization for lubricant-coolant liquids with mesogenic additives for metalworking are described. The positive action into the technological characteristics of the drilling and reamer process was observed. The results of the experiments indicate that the best working properties for MWF are achieved at the optimal concentration of additives near 3...4 mas. %. For materials with higher hardness the compositions with high concentration of additives having a temperature of the mesomorphic phase existence over 100 °C can be recommended.*

**Key words:** additives, liquid crystals, cholesterol, metalworking, metalworking fluids.

## Введение

Улучшение процесса обработки металлов напрямую зависит от эффективности применяемых смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС). Одним из наиболее действенных способов их совершенствования является улучшение состава СОТС посредством введения в них различных по природе и химическому строению функциональных присадок [1]. Общим недостатком применения функциональных присадок является в большинстве случаев их токсичность. Поэтому большой интерес вызывает замещение их в составе СОТС экологически более безопасными аналогами.

К таким альтернативным присадкам относятся мезогенные (жидкокристаллические) соединения холестерина (МСХ). Данные вещества являются нетоксичными, не обладают канцерогенным действием, полностью биоразложимы. Кроме того, благодаря своему химическому строению молекулы МСХ способны структурироваться в зонах трибологического контакта инструмента и обрабатываемой поверхности [1–8].

Интерес нашего исследования связан с изучением свойств ряда присадок МСХ, имеющих более высокие температуры существования мезоморфного состояния, а также включающие в свой состав атомы активных элементов. В частности, нами было выявлено, что наилучшей способностью улучшать условия трения обладают холестерилловые эфиры, содержащие в своем составе атом хлора. Трибологическая активность данных присадок может быть связана со способностью в процессе трения распадаться на фрагменты с образованием свободных радикалов хлора и молекулярного остатка, которые иммобилизуются на металлической поверхности, образуя прочную защитную пленку [9–10]. Однако из-за экологических требований использование хлорсодержащих компонентов в СОТС нежелательно.

Известно, что смазочное действие смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) при обработке металлов тоже во многом определяется их способностью разлагаться по радикальным механизмам, образуя на поверхностях прочные хемосорбированные защитные смазочные пленки. Применяя в качестве присадок к СОТС МСХ, можно ожидать синергического эффекта от применения присадок не только химически активных, но и способных структурно упорядочиваться в зоне контакта [11].

Кроме того, при разработке композиционных составов СОТС следует помнить, что рабочая часть инструмента нагрета неравномерно. Средняя температура в зоне контакта не превышает 100–150 °С. Но на некоторых участках режущей кромки сверла температура поверхности может достигать 400 °С. Во время при скольжении стружки по винтовым поверхностям температура падает до комнатной. При этом по всей длине рабочей части сверла необходимо обеспечить максимально легкое скольжение стружки. Поэтому предлагается использовать в составе смазочной композиции смеси высокотемпературных и низкотемпературных МСХ. Такая смесь обеспечит непрерывное существование структурированного состояния смазки в зоне резания по всей длине рабочей части сверла.

Целью работы являлась оптимизация состава смазочно-охлаждающих композиций путем введения в них мезоморфных соединений с различными температурными интервалами существования холестерической мезофазы на операциях сверления и развертывания.

## Экспериментальная часть

### *Оптимизация состава в СОТС с присадками МСХ при сверлении*

С использованием методов математического планирования нами были проведены исследования и определены составы СОТС, содержащих комбинацию двух присадок МСХ с различным температурным диапазоном существования холестерической мезофазы, обеспечивающих в небольшом диапазоне концентраций наилучшее смазочное действие при сверлении конструкционных сталей марок Ст3, сталь 45 и сталь 40Х.

Подбор оптимальных составов СОТС по содержанию в них данных присадок МСХ и обработка результатов экспериментов проводились с использованием математического планирования эксперимента. В ходе эксперимента варьировалось содержание присадки в СОТС на базе индустриального масла И-20А.

В качестве изменяемых параметров были взяты концентрация в СОТС высокотемпературной присадки – Х-37 и низкотемпературной присадки Х-16 отобранные на основании наших ранних исследований [10]. Физико-химические свойства присадок приведены в таблице 1.

Таблица 1. Физико-химические свойства присадок МСХ [12]

Промышленное наименование	Название соединения	Химическая формула	Температура плавления °С	Температура превращений в мезоморфной фазе, °С	Температура превращения в изотропную жидкость, °С	Молекулярная масса	Число атомов углерода в радикале кислоты
Х-16	Холестерилловый эфир олеиновой кислоты	C <sub>45</sub> H <sub>78</sub> O <sub>2</sub>	–	–	–	650	18
Х-37	Холестерилловый эфир <i>n</i> -октилоксибензойной кислоты	C <sub>42</sub> H <sub>66</sub> O <sub>3</sub>	138,5 С→S	171,5 S→Ch	200,5 Ch→I	618	15

Испытания смазочной способности СОТС проводились на стенде по схеме, предложенной в справочнике [1] при сверлении. Режим обработки: скорость резания 21,9 м/мин (1040 об/мин), осевая нагрузка 270 Н. Используемый инструмент – сверла Ø 6,7 мм из быстрорежущей стали Р6М5. Подача СОТС осуществлялась капельным методом с расходом 1 мл/мин. Образцы обрабатываемого материала изготавливались в виде цилиндрических шайб Ø 80 × 10 мм.

Образцы для исследований закреплялись в держателе на столике динамометра, который

позволял определять крутящий момент, возникающий при сверлении и развертывании. Сигнал с датчиков динамометра поступал через АЦП на ПК и обрабатывался программой *PowerGraph 3.0*. За критерий отклика принимался средний момент сверления. Каждый опыт проводился не менее пяти раз.

При планировании эксперимента использовалась матрица планирования для двухфакторного эксперимента с трехуровневым варьированием факторов. Уровни варьирования содержания присадки приведены в табл. 2.

Таблица 2. Уровни варьирования содержания присадки в СОТС

Фактор	Содержание присадки в составе СОТС, мас. %	
	Х-16	Х-37
Основной уровень (X <sub>0</sub> , Y <sub>0</sub> )	2	0,75
Интервал варьирования (ΔX, ΔY)	2	0,75
Верхний уровень (x, y = I)	4	1,5
Нижний уровень (x, y = -I)	0	0

Для определения погрешности воспроизводимости при каждой комбинации факторов проводилось не менее 3–5 опытов. Кодировка факторов осуществлялась по формулам

$$x = \frac{X - X_0}{\Delta X}; \quad y = \frac{Y - Y_0}{\Delta Y}. \quad (1)$$

Регрессионная модель искалась в виде полинома второй степени:

$$M = a_0 + a_1x + a_2y + a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{12}xy. \quad (2)$$

Для расчета коэффициентов нашей модели использовался пакет статистической обработки *Statgraphics Centurion XV Professional 15.1.02*. Уровень значимости каждого коэффициента оценивался по степени его вклада в общую сумму квадратов, обусловленную регрессией, отнесенную к сумме квадратов ошибок (F-отношение или критерий Фишера), величина которого имеет тенденцию к возрастанию с ростом значимости коэффициента. Результаты расчета коэффициентов регрессионной модели приведены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры регрессионных моделей влияния концентрации присадки МСХ на крутящий момент при сверлении сталей

Параметр модели	Вид обрабатываемого материала		
	Ст3	Сталь 45	Сталь 40Х
$a_0$	0,783	0,661	0,806
$a_1$	-0,069	-0,024	-0,019
$a_2$	-0,042	-0,079	-0,017
$a_{12}$	0,047	0,019	0,016
$a_{11}$	0,037	0,026	0,096
$a_{22}$	0	0,101	0,028
<b>Критерий Пирсона, <math>R^2</math></b>	0,85	0,83	0,890

Анализ данных зависимостей показал, что уравнения для сталей 45 и 40х имеют одинаковую структуру и характер поведения. Так, в обоих случаях преобладает действие присадки Х-37, а для стали Ст3 большее воздействие оказывает присадка Х-16. Это можно объяснить различным распределением температурных зон. Так, для сталей 45 и 40Х, вследствие их повышенной твердости по сравнению с сталью Ст3, преобладают области с температурой более 100 °С, в которых работают высокотемпературные присадки.

В качестве примера на рисунке 1 приведен график влияния концентрации присадок в масле И-20А на момент сверления на примере обработки стали 40Х. Из графика следует, что эта зависимость существенно нелинейна и имеет ярко выраженный минимум, соответствующий оптимальному содержанию присадок в масле.

Полученные модели позволили рассчитать оптимальную концентрацию выбранных присадок в масле. Были проведены сравнительные испытания СОТС с оптимальной концентрацией присадок МСХ и промышленной СОТС СП-4 (ТУ 0258-100-05744685-96), результаты которых приведены в табл. 4. Предлагаемые составы обеспечивают момент резания на 15–20 % ниже промышленного прототипа.

Момент резания не является единственным показателем эффективности СОТС. При обработке материалов к показателям процесса кроме момента резания относятся коэффициент утолщения стружки, стойкость инструмента, шероховатость обработанной поверхности и др. Нами были проведены исследования влияния СОТС с оптимизированным содержанием присадки для сверления стали 45 в сравнении с резанием без СОТС и использованием в качестве СОТС И-20А и СП-4. Результаты эксперимента приведены в табл. 5.

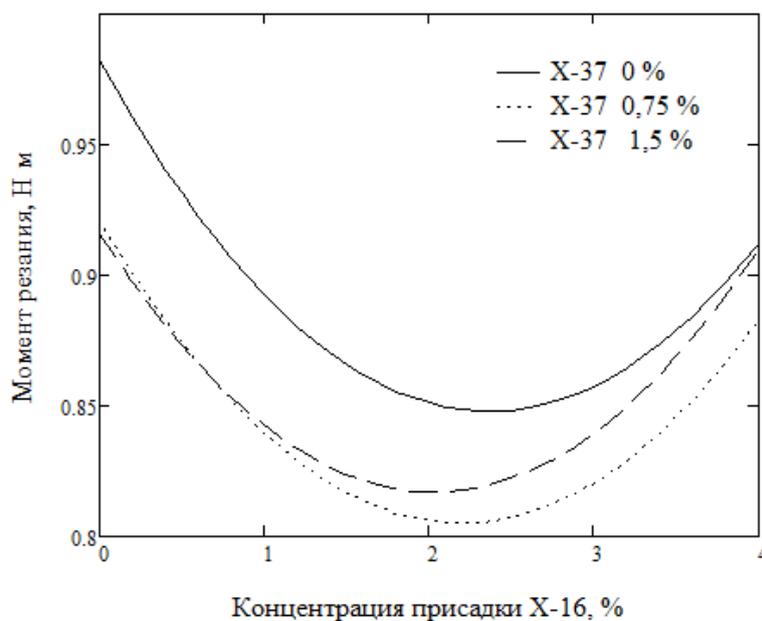


Рис. 1. Влияние концентрации присадок Х-16 и Х-37 в базовом масле И-20А на момент резания при сверлении

Таблица 4. Свойства оптимизированных составов СОТС

Марка стали	Концентрации, мас. %		Момент резания, Н·м		Относительная эффективность смазочного действия
	Х-16	Х-37	Рациональная СОТС	СП-4	
Сталь 3	2,64	1,5	0,726	0,893	1,23
Сталь 45	3,246	1,088	0,636	0,756	1,19
Сталь 40Х	2,15	0,954	0,803	0,936	1,16

Таблица 5. Влияние СОТС на показатели процесса сверления стали 45

СОТС	Момент сверления, $M, Н^*м$	Время сверления, $T, с$	Толщина стружки $A, мкм$	Толщина срезаемого слоя $a_n, мкм$	Поперечная усадка стружки $K_d = A/a_n$	Плотность витков стружки $g, см^{-1}$	Подача сверла, $S_m, мм/мин$	Период стойкости $T_c, мин$
–	1,15	33,5	169,4	17,25	9,8	3,2	17,9	45,3
И-20А	$0,96 \pm 0,03$	30,2	154,9	19,1	8,1	2,5	19,9	51,4
СП-4	$0,75 \pm 0,3$	28,1	143,6	20,6	6,97	2,5	21,4	57,8
Экспериментальный состав	$0,63 \pm 0,2$	28,3	129,0	20,4	6,3	1,5	21,2	68,5

Из таблицы следует, что кроме снижения момента резания уменьшаются толщина стружки, усадка стружки, увеличивается период

стойкости сверл в 1,5 раза по сравнению с резанием в сухую и на 20 %, по сравнению с резанием СП-4 (рис. 2).

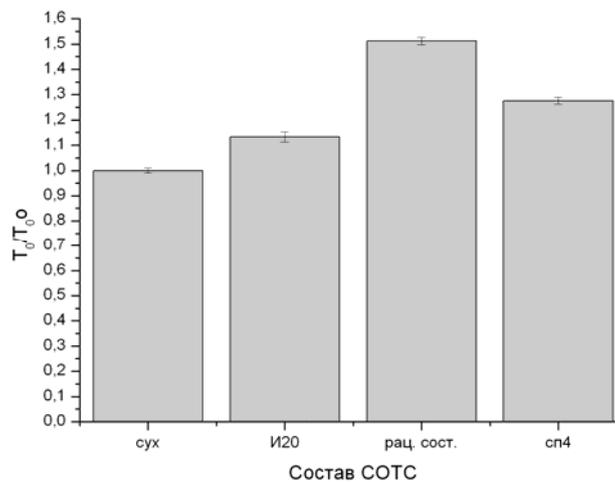


Рис. 2. Влияние на период стойкости сверл при сверлении стали 45 с применением различных СОТС

### Оптимизация состава СОТС с присадками МСХ при развертывании

Сверление во многих случаях является операцией черновой металлообработки. Для получения калиброванных отверстий применяется развертывание. Развертывание – одна из ответственных технологических операций. Ее производят после предварительного сверления и зенкерования для получения отверстия с меньшей шероховатостью. Вращающийся инструмент – развертка снимает лезвиями мельчайшие стружки с внутренней поверхности отверстия. Значи-

тельное влияние на шероховатость поверхности и точность развертываемого отверстия оказывают смазывание и охлаждение. В то же время в отличие от сверления температуры в зоне резания не столь высоки, что дает возможность использовать МСХ-присадки с низкими температурами существования мезоморфной фазы.

Для проведения исследований нами был разработан ряд экспериментальных составов СОТС, которые изготавливали на основе базового масла И-20А введением присадок МСХ. Марки и химические формулы присадок указаны в табл. 6.

Таблица 6. Присадки МСХ в СОТС для операции развертывания

Марка присадки	Химическая формула	Молекулярная масса, а.е.м.
X-19	H COO–Chol*	414
X-28	C <sub>14</sub> H <sub>29</sub> COO–Chol	606

\*Chol – радикал холестерина. Химическая формула – C<sub>27</sub>H<sub>45</sub>

Присадки растворяли на водяной бане в базовом масле при температуре 95–100 °С. Содержание присадок в базовом масле варьировалось от 0 до 20 мас. %. Испытания на развертывание проводились в следующих условиях. В качестве обрабатываемого материала использовались образцы из стали 45 толщиной 10 мм. Образец жестко закрепляли на столике сверлильного станка, высверливали отверстие Ø 6,7 мм, а затем развертывали отверстие разверткой Ø 7 мм с классом точности 7Н из быстрорежущей стали Р6М5. Режим сверления отверстия под развертывание (скорость резания – 27,3 м/мин, подача – 0,1 мм/об, масло И-20А). Режим развертывания (скорость резания – 11,4 м/мин, подача – 0,7 мм/об, экспериментальные составы).

После развертывания измеряли шероховатость обработанной поверхности  $R_a$  на профилографе-профилометре «Абрис ПМ-7». Исходная шероховатость  $R_a$  после сверления составляла  $2,9 \pm 0,2$  мкм. После развертывания без использования СОТС  $R_a = 2,1$  мкм. При развертывании с использованием в качестве СОТС индустриального масла И-20А

шероховатость уменьшается лишь незначительно, до 1,9 мкм.

Установлено, что введение присадок МСХ в СОТС действительно приводит к уменьшению шероховатости обработанной поверхности при развертывании. На рисунке 3 представлены результаты эксперимента по влиянию концентрации присадки в СОТС на примере двух присадок МСХ X-19 и X-28 одинаковой химической природы с разной молекулярной массой, не имеющих граничной растворимости в базовом масле.

Основной характер влияния присадок одинаковый. Кривые имеют явно выраженный минимум. Можно сделать вывод, что при развертывании отверстий также имеется определенная оптимальная концентрация присадки, обеспечивающая наилучшие свойства СОТС.

При малых концентрациях присадки идет уменьшение шероховатости. При достижении определенной концентрации достигается минимум шероховатости. Затем дальнейшее увеличение приводит к возрастанию шероховатости обработанной поверхности.

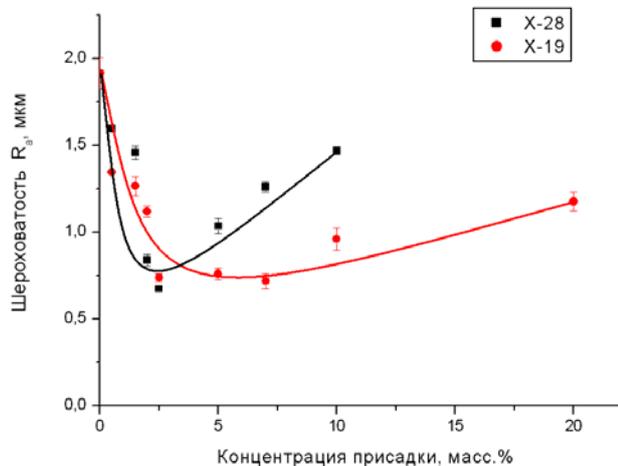


Рис. 3. Влияние концентрации присадки на шероховатость поверхности при развертывании отверстий

Ухудшение свойств можно объяснить увеличением вязкости состава, что приводит к ухудшению проникающей способности СОТС в зону обработки. Применение присадок МСХ дает примерно один и тот же результат по снижению шероховатости. Шероховатость  $R_a$  снижается от 1,97 мкм при использовании чистого И-20А до 0,7 мкм, т. е. почти в три раза. В то же время следует отметить, что использование присадки с большей молекулярной массой X-28 приводит к появлению более резко выраженного минимума при концентрации присадки 2,7 мас. %. При использовании более легкой присадки минимум более широкий – от 2,5 до 7 мас. %.

### Выводы

Результаты экспериментов свидетельствуют, что при приготовлении СОТС на базе И-20А с присадками МСХ наилучшие рабочие свойства СОТС на операциях сверления и развертывания достигаются при определенной оптимальной концентрации присадок. Оптимальное количество присадки зависит от вида обработки и обрабатываемого материала. Наилучшие свойства показали составы, содержащие в сумме 3–4 мас. % присадок МСХ. Для материалов с более высокой твердостью можно рекомендовать составы с повышенным содержанием присадок, имеющих температуру существования мезоморфной фазы выше 100 °С.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

### Список литературы / References

1. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием : справочник / под ред. Л. В. Худобина. М.: Машиностроение, 2006. 544 с. [Smazochno-okhlazhdayushchie tekhnologicheskie sredstva i ikh primeneniye pri obrabotke rezaniem : spravochnik (Lubricating and cooling technology tools and their application in cutting : handbook) / pod red. L. V. Khudobina. M. : Mashinostroenie, 2006. 544 p. (in Russian)].
2. Справочник по триботехнике / под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 1990. Т. 2. 420 с. [Spravochnik po tribotekhnike (Handbook of tribotechnology) / pod obshch. red. M. Khebdy, A. V. Chichinadze. M. : Mashinostroenie, 1990. Vol. 2. 420 p. (in Russian)].
3. Топлива, смазочные материалы и технические жидкости. Ассортимент и применение : справочник / под ред. В. М. Школьникова. М.: Издательский центр «Техинформ», 1999. 596 с. [Topliva, smazochnyye materialy i tekhnicheskie zhidkosti. Assortiment i primeneniye : spravochnik (Fuels, lubricants and industrial fluids. Range and application : handbook) / pod red. V. M. Shkol'nikova. M. : Izdatel'skiy tsentr «Tekhinform», 1999. 596 p. (in Russian)].
4. Ермаков С. Ф. Трибофизика жидких кристаллов. Гомель : ИММС НАН Беларусь. 2008. 232 с. [Ermaikov S. F. Tribofizika zhidkikh kristallov (Tribophysics liquid crystals). Gomel' : IMMS NAN Belarus', 2008. 232 p. (in Russian)].
5. Суслов А. А. Ермаков С. Ф. Жидкие кристаллы в триботехнике (обзор) // Материалы, технологии, инструменты. 1997. № 1. С. 5–11. [Suslov A. A. Ermaikov S. F. Zhidkie kristally v tribotekhnike (obzor) (Liquid crystals in tribo-engineering (review)) // Materialy, tekhnologii, instrumenty (Materials, technologies and tools). 1997. № 1. P. 5–11 (in Russian)].
6. Павлов А. С., Березина Е. В., Годлевский В. А. Применение производных холестерина в качестве присадок пластичных смазочных материалов // Вестник машиностроения. 2011. № 6. С. 44–47. [Pavlov A. S., Berezina E. V., Godlevskii V. A. Adding cholesterol derivatives to plastic lubricants // Russian Engineering Research. 2011. Vol. 31, № 6. P. 552–555]. DOI: 10.3103/S1068798X11060190.
7. А. с. СССР 601304. Смазочно-охлаждающая жидкость для механической обработки металлов / Р. И. Карабанов, В. Н. Латышев, И. Г. Чистяков, В. М. Чайковский ; опубл. 1978, Бюл. № 13.

- [Certificate of authorship USSR 601304. Smazochno-okhlazhdayushchaya zhidkost' dlya mekhanicheskoy obrabotki metallov (Cutting fluid for machining metals) / R. I. Karabanov, V. N. Latyshev, I. G. Chistyakov, V. M. Chaykovskiy; opubl. 1978, Byul. № 13 (in Russian)].
8. *Суслов А. А., Ермаков С. Ф.* Жидкокристаллические присадки в финишной обработке материалов // *Материалы, технологии, инструменты.* 1998. № 2. С. 87–88. [*Suslov A. A., Ermakov S. F.* Zhidkokristallicheskie prisadki v finishnoy obrabotke materialov (Liquid crystal additives in finishing materials) // *Materialy, tekhnologii, instrumenty (Materials, technologies and tools).* 1998. № 2. P. 87–88 (in Russian)].
  9. *Латышев В. Н., Новиков В. В., Сырбу С. А., Колбашов М. А.* Трибологические свойства некоторых жидкокристаллических соединений холестерила // *Трение и износ.* 2009. Т. 30, № 6. С. 564–568 [*Latyshev V. N., Novikov V. V., Syrbu S. A., Kolbashev M. A.* Tribological properties of some cholesterical liquid-crystal additives // *Journal of Friction and Wear.* 2009. Vol. 30, № 6. P. 411–414]. DOI: 10.3103/S1068366609060063.
  10. *Новиков В. В., Латышев В. Н., Маршалов М. С., Нуждина Е. Е., Колбашов М. А.* Свойства режущих масел с присадками жидких кристаллов // *Трение и износ.* 2011. Т. 32, № 6. С. 596–601 [*Novikov V. V., Latyshev V. N., Marshalov M. S., Nuzhdina E. E., Kolbashev M. A.* Properties of cutting oils with additives of liquid crystals // *Journal of Friction and Wear.* 2011. Vol. 32, № 6. P. 452–456]. DOI: 10.3103/S1068366611060109.
  11. *Латышев В. Н.* Трибология резания. Кн. 1: Фрикционные процессы при резании металлов. Иваново: Иван. гос. ун-т, 2009. 108 с. [*Latyshev V. N.* Tribologiya rezaniya. Kn. 1: Friksionnye protsessy pri rezanii metallov (Tribology of cutting. Vol. 1: Friction processes in metal cutting). Ivanovo: IvSU, 2009. 108 p. (in Russian)].
  12. *Demus D., Demus H., Zschke H.* Flussige kristalle in tabellen. Leipzig, VEB Deut. Verlag, 1974. 356 s.

Поступила в редакцию 16.03.2015 г.