Научная статья
УДК 621.923.027:621.9.025.5

ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ ТОКАРНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ЕГО ОХЛАЖДЕНИИ НАПОРНОЙ СТРУЕЙ СОТС

Л.Б. Шрон[1], В.Б. Богуцкий[1,2,*]

[1] ГБОУВО РК «Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова», Симферополь, Россия
[2] ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Россия
* E-mail: bogutskivb@yandex.ru

Аннотация. Выполнен анализ подходов по уменьшению расхода смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) при токарной обработке за счет применение, направляемой под высоким давлением тонкой струи со стороны задней поверхности инструмента. Отмечается, что сокращение объема используемой СОТС приводит к получению практически сухих заготовок и стружки, сводя к минимуму потери, вызванные испарением и непроизводственные затраты, которые могут быть значительными при использовании подачи СОТС поливом. Подчеркивается, что большая часть тепла, поглощаемого СОТС, расходуется на ее нагрев и только относительно небольшое количество идет на парообразование. Определены необходимые для эффективного теплоотвода оптимальные параметры потока СОТС, такие как толщина и скорость струи. Сделан вывод о том, что охлаждение направленной напорной струей целесообразно рекомендовать для резцов из быстрорежущих сталей в тех случаях, когда необходимо значительно повысить стойкость или скорость резания, а использование твердосплавных инструментов не представляется возможным.

Ключевые слова: *смазочно-охлаждающая технологическая среда; токарная обработка; напорная струя; теплоотвод; температура резания.*

Для цитирования: Шрон Л.Б., Богуцкий В.Б. Повышение стойкости токарного инструмента при его охлаждении напорной струей СОТС // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2025. Т. 11. № 3. С. 73–81.

Original article

INCREASING THE DURABILITY OF A TURNING TOOL WHEN IT IS COOLED BY A PRESSURE JET OF CUTTING FLUIDS COOLANT

L.B. Shron[1], V.B. Bogutsky[1,2,*]

[1] SBEIHE RC «Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov», Simferopol, Russia
[2] FSEI HE «Sevastopol State University», Sevastopol, Russia
* E-mail: bogutskivb@yandex.ru

Abstract. An analysis of approaches to reduce the consumption of cutting fluids coolant (CFC) during turning due to the use of a thin jet directed under high pressure from the back surface of the tool has been performed. It is noted that the reduction in the volume of CFC used leads to the production of practically dry blanks and chips, minimizing losses caused by evaporation and non-

© Шрон Л.Б., Богуцкий В.Б. 2025

production costs, which can be significant when using the CFC supply by irrigation. It is emphasized that most of the heat absorbed by the CFC is spent on heating it, and only a relatively small amount is used for vaporization. The optimal parameters of the CFC flow, such as the thickness and velocity of the jet, necessary for effective heat removal, have been determined. It is concluded that it is advisable to recommend directional pressure jet cooling mainly for high-speed steel cutters in cases where it is necessary to significantly increase cutting resistance or speed, and the use of carbide tools is not possible.

Keywords: *lubricating and cooling process medium; turning; pressure jet; heat sink; cutting temperature.*

For citation: Shron L.B., Bogutsky V.B. Increasing the durability of a turning tool when it is cooled by a pressure jet of cutting fluids coolant // *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2025. Vol. 11. No. 3, pp. 73–81.

Введение

Использование смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) при обработке резанием позволяет повысить период стойкости режущего инструмента, улучшить условия стружкообразования и свойства поверхностного слоя, снизить силы резания и т. д. В настоящее время имеет место тенденция сокращения использования СОТС, что связано как с технологическими, так и с экологическими факторами, в том числе с все более жесткими международными нормами по охране окружающей среды [1-6].

Одним из способов уменьшения расхода смазочно-охлаждающих технологических сред при токарной обработке является применение тонкой струи СОТС, направляемой под высоким давлением со стороны задней поверхности инструмента (напорной струи) [7-11]. Целенаправленное применение СОТС непосредственно в месте использования обеспечивает хорошее смазывание поверхностей контакта между инструментом, обрабатываемой деталью и стружкой. Резкое сокращение количества СОТС приводит к получению практически сухих заготовок и стружки, а также минимизации потерь из-за испарения и непроизводительных расходов, которые могут быть значительными при использовании подачи СОТС поливом [1, 3, 8, 12].

Методика и результаты исследования

Эффективность ·напорной струи определяется главным образом ее охлаждающим действием – количеством тепла, отбираемого от инструмента. Для обоснования рациональных характеристик напорной струи СОТС подаваемой под давлением на заднюю поверхность резца (рис. 1) необходимо выполнить расчёт теплоотвода и установить факторы, определяющие ее эффективность.

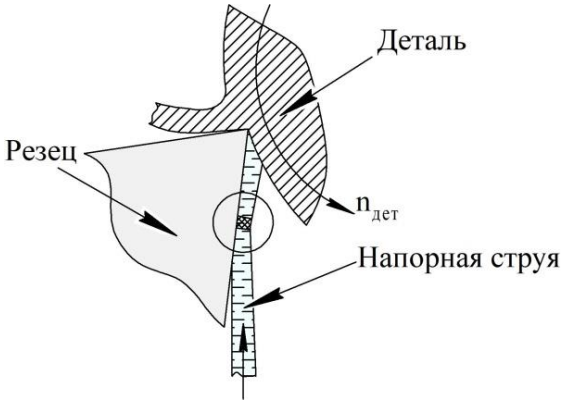


Рисунок 1 – Направление потока жидкости, омывающей заднюю поверхность резца

Определим изменение теплосодержания призмы с основанием, равным единице, выделенной в потоке СОТС, омывающей резец и расположенной по нормали к охлаждаемой поверхности (рис. 2).

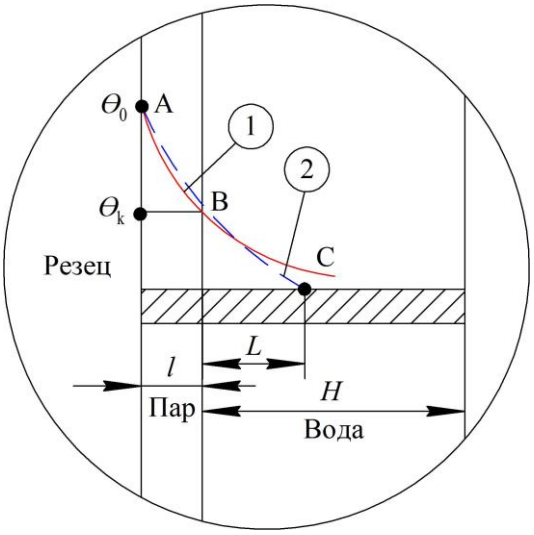


Рисунок 2 – Графический расчет теплосодержания (1 − истинное распределение температур; 2 − распределение температур принятое при расчетах для поверхности охлаждения 4×3 мм^2

Изменение теплосодержания выделенной призмы рассчитывалось на основе приближенного решения одномерной задачи Стефана [13-14] для небесконечного тела, заключающееся в замене истинного распределения температур для каждого момента времени τ стационарным [15-17]. За время τ контакта струи с задней поверхностью, равное частному от деления протяженности их взаимного контакта в направлении движения струи на скорость ее перемещения $V_{стр}$ которая определяется по зависимости

$$V_{стр} = C_V \sqrt{p}.$$

где p – давление, C_V – коэффициент скорости.

При температуре охлаждаемой поверхности выше точки кипения жидкости между ними должна образоваться паровая пленка.

В ограниченной по протяженности l первой зоне (пар) такая замена, очевидно, допустима (пунктир АВ). В неограниченной второй зоне (вода) стационарное состояние за конечный промежуток времени принципиально невозможно. Поэтому вводится переменная длина L, названная подвижным радиусом теплового влияния (толщина потока жидкости превышает L), на которой распределение температур считается стационарным (пунктир ВС).

Количество тепла G, аккумулированное рассматриваемой прямой за время τ, равно

$$G = \left[C_2\gamma_1\theta_k + K\gamma_1 + 0{,}5C_1\gamma_1(\theta_0 - \theta_k)\right]\cdot l + 0{,}5C_2\gamma_2\theta_k L. \quad (1)$$

Так как тепловой поток от охлаждаемой поверхности к рассматриваемой призме, равный коэффициенту теплопроводности первой зоны (пар) λ_1, умноженному на на градиент температур $\left(\frac{\lambda_1(\theta_0 - \theta_k)}{l}\right)$, расходуется на изменение теплосодержания пара и воды $\frac{dG}{d\tau}$, следовательно

$$\frac{dG}{d\tau} = \left[C_2\gamma_1\theta_k + K\gamma_1 + 0{,}5C_1\gamma_1(\theta_0 - \theta_k)\right]\cdot\frac{dl}{d\tau} + 0{,}5C_2\gamma_2\theta_k\frac{dL}{d\tau} = \lambda_1\frac{\theta_0 - \theta_k}{l}. \quad (2)$$

где γ – удельный вес; C – теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности (индекс 1 относится к пару, индекс 2 – к воде); $a = \frac{\lambda}{C\gamma}$ – коэффициент температуропроводности; K – скрытая теплота парообразования; $\theta_к$ – температура кипения; $\theta_о$ – температура охлаждаемой поверхности (значения $\theta_к$ и $\theta_о$ отсчитываются от начальной температуры СОТС, принятой за нуль).

Определим максимально возможную величину l в предположении, что все тепло аккумулируется в первой зоне, и обозначим ее l', а соответствующее количество тепла – G. При этом условии вода не отбирает тепло с границы изменения агрегатного состояния и L=0.

Для принятых условий

$$\frac{dG}{d\tau} = \left[C_2\gamma_1\theta_k + K\gamma_1 + 0{,}5C_1\gamma_1(\theta_0 - \theta_k)\right]\cdot\frac{dl'}{d\tau} = \lambda_1\frac{\theta_0 - \theta_k}{l'}. \quad (3)$$

После интегрирования (3) с учетом, что при τ=0 l'=0 получаем

$$l' = \sqrt{\frac{2\tau}{\frac{C_2\gamma_1\theta_k + K\gamma_1}{\lambda_1(\theta_0 - \theta_k)} + \frac{C_1\gamma_1}{2\lambda_1}}}; \quad (4)$$

$$G = \left(\gamma_1 C_2\theta_k + K\gamma_1 + 0{,}5C_1\gamma_1(\theta_0 - \theta_k)\right)\cdot l'. \quad (5)$$

Количество тепла, переходящее в воду G', при пленочном кипении не зависит от температуры охлаждаемой поверхности инструмента, так как вода поглощает тепло с границы изменения агрегатного состояния, имеющей постоянную температуру $\theta_к$.

Значения G' и L, рассчитанные в соответствии с распределением температур, показанным на рис. 2 составят:

$$G' = C_2\gamma_2\theta_k\sqrt{a_2\tau}; \quad (6)$$

$$L = 2\sqrt{a_2\tau}. \quad (7)$$

Более точное значение G', рассчитанное с учетом истинного распределения температур, будет иметь вид:

$$G' = 2C_2\gamma_2\theta_k\sqrt{\frac{a_2\tau}{\pi}}. \quad (8)$$

Выполненные по формулам (5) и (8) расчеты величин G и G' показывают, что при практически применяемых параметрах напорной струи значение G меньше G' в 60 раз при θ_0=130°С и в 12 раз при θ_0=980°С (в среднем отличается от точного на 11,4 %), то есть значением G при расчете теплоотвода можно пренебречь, тем более, что значения G были изначально определены завышенными, исходя из условия отсутствия утечки тепла в воду с границы изменения агрегатного состояния.

Исходя из этого расчетная формула для теплоотвода W при температуре охлаждаемой поверхности, превышающей точку ·кипения жидкости (в рассматриваемом случае 100°С), может быть представлена в следующем виде:

$$W = 8{,}7AC_2\gamma_2(100-\theta_н)\sqrt{a_2BV_{стр}}\text{, ккал/час.} \quad (9)$$

где A – средняя ширина потока жидкости, м; B – протяженность контакта жидкости с инструментом в направлении движения потока, м; $\theta_н$ – начальная температура жидкости, °С; $V_{стр}$ – скорость струи, м/ мин; C_2 – ккал/кг×°С; γ_2 – кг/м^3; a_2 – м^2/ч.

Если температура охлаждаемой поверхности ниже точки кипения жидкости, то приближенный расчет теплоотвода (не учитывая изменения скорости струи по сечению потока) может быть также выполнен по формуле (9), где вместо числа 100 надо поставить значение температуры охлаждаемой поверхности.

Результаты расчета теплоотвода позволяют сделать следующие выводы:

1. Основная часть тепла, поглощаемого СОТС, расходуется на ее нагрев, а на парообразование идет относительно небольшое количество тепла.

2. Теплоотвод интенсивно возрастает с увеличением температуры охлаждаемой поверхности до достижения точки кипения СОТС, после чего значительно не изменяется.

3. С повышением температуры СОТС теплоотвод интенсивно убывает.

4. Оптимальная толщина потока СОТС, активно участвующая в теплоотводе (с учетом неравномерности толщины потока), 0,015…0,018 мм при скорости струи 2500…3500 м/мин.

5. Повышение скорости струи $V_{стр}$ увеличивает теплоотвод пропорционально $\sqrt{V_{стр}}$.

Для сравнения эффективности различных способов применения СОТС при точении сталей 45 и 40Х был выполнен ряд экспериментальных работ, в которых за основные параметры оценки эффективности были приняты скорость потока или струи и расход СОТС в единицу времени. Пределы изменения режимов резания приведены в табл. 1.

При охлаждении поливом расход СОТС составлял $Q_п$=8…10 л/мин при скорости потока 100 м/мин. При охлаждении напорной струей расход составлял $Q_{ст}$=0,44 л/мин. Скорость истечения $V_{ст}$ =2500 м/мин. Принимая размерность скорости струи в м/мин и давления в МПа, значения величины C для сопел диаметрами 0,25…0,5 мм получили равными 770…810, а для сопел диаметрами 0,15 мм – 660. Значения C для стальных сопел диаметрами 1,4…0,6 мм и щелевидных размером 2,5×0,27 мм, имеющих худшую чистоту поверхности, были значительно ниже и равнялись 600…700 в зависимости от качества изготовления отдельных образцов.

Таблица 1 − Режимы резания при проведении экспериментальных работ.

Марка стали	Материал инструмента	Режимы резания		
		t, мм	S, мм	V, м/мин
45	Р6М5	1…3	0,16…0,79	24…35
40Х		1…2	0,1…0,4	28…100
45	Т15К6	2	0,24	170
45		2	0,2	250

Выполненные экспериментальные работы позволяют сделать следующие заключения:

1. Рациональными следует считать расход эмульсии 0,4…0,7 л/мин и скорость струи 2500…3500 м/мин, получаемые при выходных отверстиях сопел диаметрами 0,4…0,6 мм и давлениях в системе, подающей эмульсию, 1,47…1,96 МПа. Увеличением скорости струи

сверх рекомендуемых значений можно лишь незначительно повысить период стойкости резцов при значительном повышении давлений в системе.

2. Применение напорной струи для охлаждения быстрорежущих резцов обеспечивает более высокие показатели по износостойкости по сравнению с охлаждением поливом (см. табл. 2). Приведенные данные показывают, что эффективность охлаждения напорной струей по сравнению с охлаждением поливом возрастает с увеличением подач. Обращает на себя внимание также то, что с увеличением скорости резания эффективность охлаждения напорной струей возрастает при больших значениях подач, остается стабильной при подаче, равной 0,125 мм/об и уменьшается при небольших значениях подач.

Таблица 2 − Средние значения повышения стойкости резцов при обработке сталей 45 и 40Х, при охлаждении напорной струей

Диапазон стойкости Т, мин при охлаждении поливом	Относительное повышение стойкости, %			
	Подача, мм/об			
	0,6…0,8	0,35…0,45	0,2…0,25	0,05…0,1
5…10	7	5	4	1,2
20…30	5	4	4	2
40…60	4	3	4	3
1. При подачах s>0,2 мм/об повышение скорости резания с условием сохранения неизменной стойкости составляет 35 %, а при подаче 0, 1 .мм/об – 10…20%. 2. Стойкость при охлаждении поливом принята за 1,0.				

3. С применением напорной струи интенсивность износа резцов уменьшается, и значительно увеличиваются значения износа по задней поверхности, предшествующие разрушению режущей кромки.

4. При скоростном точении сталей резцами, оснащенными твердыми сплавами, эффективность охлаждения напорной струёй значительно меньше, чем при работе быстрорежущими резцами. Если принять в расчет уровень экономически рентабельных периодов стойкости, ее повышение в условиях скоростного точения составит в среднем 20-40 % по сравнению с обычным способом охлаждении.

5. Измерения температуры резания при применении быстрорежущих резцов показали, что наименьшее значение температуры имеет место при применении напорной струи. По сравнению с охлаждением поливом понижение температуры резания, измеренной методом естественной термопары, составляет 20…50 °С в зоне высоких скоростей резания·(низких периодов стойкости для обычного способа охлаждения, измеряемых минутами) и значительно возрастает с понижением скорости резания (до 150…200 °С).

Заключение

Охлаждение напорной струей целесообразно рекомендовать главным образом для быстрорежущих резцов в тех случаях, где необходимо значительно повысить стойкость или скорость резания и не удается применить инструменты, оснащенные твердыми сплавами (например, точение труднообрабатываемых сталей, работа с ударной нагрузкой на резец, отрезка и прорезка канавок и др.).

В зависимости от конкретных организационно-технических условий охлаждение напорной струей может быть использовано для повышения периодов стойкости и уменьшения времени на подналадку инструментов или для увеличения скоростей резания на 20…30%.

Уровень рациональных давлений p ограничивается мощностью имеющихся насосов и удобством работы. При работе с соплами диаметром 0,4…0,6 мм целесообразно использовать давление p=1,47…1,96 МПа чему соответствует скорость струи $V_{стр}$=2500…3500 м/мин и оптимальная толщина потока жидкости 0,015…0,018 мм. При

отсутствии соответствующих насосов могут быть применены и меньшие давления, но при этом неизбежна заметная потеря эффективности по сравнению с рекомендуемыми давлениями.

Результаты расчета позволяют объяснить целый ряд экспериментально установленных фактов, в том числе отсутствие увеличения эффективности при повышении толщины потока жидкости сверх полученных расчетом значений; прогрессивно убывающее повышение периодов стойкости с увеличением *V*, отрицательное влияние нагревания эмульсии и наоборот исключительное значение ее охлаждения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Benedictoa E., Carouc D., Rubioa E.M. Technical, economic and environmental review of the lubrication/cooling systems used in machining processes // Advances in Material & Processing Technologies Conference. Procedia Engineering. 2017. V. 184, pp. 99–116.

2. Liew P.J., Shaaroni A., Sidik N.A., Yan J. An overview of current status of cutting fluids and cooling techniques of turning hard steel // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. V. 114, pp. 380–394.

3. Kawade P., Bokade S. Review of cooling techniques used in metal cutting processes // Advances in Materials and Processing Technologies. Procedia Engineering. 2023. V. 9, No. 3, pp. 1137–1182.

4. Ashmawy M.A Review of cooling and lubrication techniques for machining difficult-to-cut material // Journal of Engineering Research. 2023. V. 7. Issue 1, pp. 21–31

5. Yang Kh. Z., Pramanik A., Basak A.K., Dong Y., Kumar K., Vatin N.I. Application of coolants during tool-based machining – A review// Ain Shams Engineering Journal. 2023. V. 14, pp. 1–15.

6. Булыжев Е.М., Худобин Л.В. Ресурсосберегающее применение смазочно-охлаждающих жидкостей при металлообработке. М.: Машиностроение, 2004. 352 с.

7. Фельдштейн Е.Э., Маруда Р., Корниевич М.А. Влияние способа охлаждения зоны резания на условия стружкообразования // Наука и техника. 2014. № 4. С. 48–53.

8. Shron L., Bogutsky V. On the question of improving the finishing operations of processing precise holes in the hulls of ship machinery// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2020 – Additive Manufacturing. 2020. Vol. 193. Paper Number 022089.

9. Satyanarayana P., Anitha B., Kumar Y.A. Effect of high pressure coolant jet (HPCJ) in drilling AISI 4340 steel// International journal of innovations in engineering research and technology. 2017. V. 4, Issue 9, pp. 5–18.

10. Madhukar S., Shravan A., Vidyanand P., Reddy G.S. A Critical review on minimum quantity lubrication (MQL) coolant system for machining operations// International Journal of Current Engineering and Technology. 2016. V. 6, No.5, pp. 1745–1751.

11. Худобин Л.В. Бердичесвский Е.Г. Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке. М.: Машиностроение, 2000. 189 с.

12. Кирейнов А.В., Есов В.Б. Современные тенденции применения смазочно-охлаждающих технологических средств при лезвийной обработке труднообрабатываемых материалов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 2 (62). С. 1–15.

13. Окулов Н.А. Об одном численном методе решения одномерных задач типа Стефана // Вычислительные методы и программирование. 2011. Т. 12. С. 238–246.

14. Будак Б.М., Соловьева Е.Н., Успенский А.Б. Разностный метод со сглаживанием коэффициентов для решения задач Стефана // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1965. № 5. С. 828–840.

15. Qodirov B., Tuyboyov O. Analyzing temperature distribution with a focus on cutting speed, tool material, and cooling methods // Journal of Advances in Engineering Technology. 2024. V. 2 (14), pp. 102–111.

16. Зезин В.Г. Механика жидкости и газа: учебное пособие. Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2016. 250 с.

17. Котоусов Л.С. Исследование скорости водяных струй на выходе сопел с различной геометрией // Журнал технической физики. 2005. Т. 75, Вып. 9. С. 8–14.

REFERENCES

1. Benedictoa E., Carouc D., Rubioa E.M. Technical, economic and environmental review of the lubrication/cooling systems used in machining processes. Advances in Material & Processing Technologies Conference. Procedia Engineering. 2017. V. 184, pp. 99–116.

2. Liew P.J., Shaaroni A., Sidik N.A., Yan J. An overview of current status of cutting fluids and cooling techniques of turning hard steel. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. V. 114, pp. 380–394.

3. Kawade P., Bokade S. Review of cooling techniques used in metal cutting processes. Advances in Materials and Processing Technologies. Procedia Engineering. 2023. V. 9, No. 3, pp. 1137–1182.

4. Ashmawy M.A Review of cooling and lubrication techniques for machining difficult-to-cut material. Journal of Engineering Research. 2023. V. 7. Issue 1, pp. 21–31

5. Yang Kh. Z., Pramanik A., Basak A.K., Dong Y., Kumar K., Vatin N.I. Application of coolants during tool-based machining – A review. Ain Shams Engineering Journal. 2023. V. 14, pp. 1–15.

6. Bulyzhev E.M., Khudobin L.V. *Resursosberegayushchee primenenie smazochno-okhlazhdayushchikh zhidkostej pri metalloobrabotke* [Resource-saving use of lubricants and coolants in metalworking]. Moscow: Mashinostroenie, 2004. 352 p.

7. Fel'dshtejn E.Eh., Maruda R.,. Kornievich M.A. *Vliyanie sposoba okhlazhdeniya zony rezaniya na usloviya struzhkoobrazovaniya* [The effect of the cooling method of the cutting area on the chip formation conditions]. Nauka i tekhnika. 2014. No. 4, pp. 48–53.

8. Shron L., Bogutsky V. On the question of improving the finishing operations of processing precise holes in the hulls of ship machinery// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2020 - Additive Manufacturing. 2020. Vol. 193. Paper Number 022089.

9. Satyanarayana P., Anitha B., Kumar Y.A. Effect of high pressure coolant jet (HPCJ) in drilling AISI 4340 steel. International journal of innovations in engineering research and technology. 2017. V. 4, Issue 9, pp. 5–18.

10. Madhukar S., Shravan A., Vidyanand P., Reddy G.S. A Critical review on minimum quantity lubrication (MQL) coolant system for machining operations. International Journal of Current Engineering and Technology. 2016. V. 6, No.5, pp. 1745–1751.

11. Hudobin L.B. Berdichesvskij E.G. *Tekhnika primeneniya smazochno-okhlazhdayushchikh sredstv v metalloobrabotke* [The technique of using lubricants and coolants in metalworking]. Moscow: Mashinostroenie, 2000. 189 p.

12. Kirejnov A.V., Esov V.B. *Sovremennye tendencii primeneniya smazochno-okhlazhdayushchikh tekhnologicheskikh sredstv pri lezvijnoj obrabotke trudnoobrabatyvaemykh materialov* [Current trends in the use of lubricants and cooling technology in blade processing of difficult-to-process materials]. Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii. 2017. No. 2 (62),·pp. 1–15.

13. Okulov N.A. *Ob odnom chislennom metode resheniya odnomernykh zadach tipa Stefana* [A numerical method for solving one-dimensional Stefan type problems]. Vychislitel'nye metody i programmirovanie. 2011. V. 12, pp. 238–246.

14. Budak B.M., Solov'eva E.N., Uspenskij A.B. *Raznostnyj metod so sglazhivaniem koehfficientov dlya resheniya zadach Stefana* [Difference method with smoothing of coefficients for solving Stefan's problems]. Zhurnal vychislitel'noj matematiki i matematicheskoj fiziki, 1965. No. 5, pp. 828–840.

15. Qodirov B., Tuyboyov O. Analyzing temperature distribution with a focus on cutting speed, tool material, and cooling methods. Journal of Advances in Engineering Technology, 2024. V. 2 (14), pp. 102–111.

16. Zezin V.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza: uchebnoe posobie* [Mechanics of liquid and gas: a textbook.] Chelyabinsk: SUSU Publishing Center, 2016. 250 p.

17. Kotousov L.S. *Issledovanie skorosti vodyanyh struj na vyhode sopel s razlichnoj geometriej* [Investigation of the velocity of water jets at the outlet of nozzles with different geometries]. Zhurnal tekhnicheskoj fiziki. 2005. V. 75, Issue 9, pp. 8–14.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Шрон Леонид Борисович – кандидат технических наук, доцент, ГБОУВО РК «Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова» (295015, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, Учебный пер, д. 8), e-mail: shronlb@mail.ru)	*Shron Leonid Borisovich* – Ph.D. (Eng), Assoc. Prof., SBEIHE RC «Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov» (295015, Russia, Republic of Crimea, Simferopol, Uchebny lane, 8), e-mail: shronlb@mail.ru).
Богуцкий Владимир Борисович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-производственного центра инжиниринговых технологий КИПУ им. Февзи Якубова, доцент кафедры «Автоматизация и технология машиностроения» ФГАОУ ВО «СевГУ» (299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская д. 33, e-mail: bogutskivb@yandex.ru)	*Bogutsky Vladimir Borisovich* – Ph.D. (Eng), senior researcher of the scientific and production center of engineering technologies of CEPU n.a. Fevzi Yakubov, Assoc. Prof. of the Department of «Automation and mechanical engineering technology» FSEI of HE «Sevastopol State University». (299053, Russia, Sevastopol, Universitetskaya str. 33, e-mail: bogutskivb@yandex.ru).

Статья поступила в редакцию 17.08.2025; одобрена после рецензирования 27.08.2025, принята к публикации 04.09.2025.
The article was submitted 17.08.2025; approved after reviewing 27.08.2025; accepted for publication 04.09.2025.