

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ РАСПЫЛЕННЫХ СОТС

Аннотация. Рассматривается тенденция полного или частичного отказа от применения СОТС в процессах механической обработки. Приводится методика определения охлаждающей способности аэрозоля распыленной жидкости. Методика позволяет оценить количество снимаемого тепла распыленным аэрозодем и минимальное необходимое количество жидкости, подаваемое в распылитель для компенсации теплового потока, возникающего в процессе резания.

Ключевые слова: механическая обработка, резание металлов, алюминиевые сплавы, смазочно-охлаждающие жидкости, смазочно-охлаждающие технологические среды, распыление, смазывание, охлаждение, испарение, тепловой поток, экология.

Abstract. Trend to full or partial refusal from cutting fluid application for machining processes is considered. The method of definition of cooling ability of a spray is described. The method allows to evaluate amount of absorbed heat an aerosol and the minimum quantity of a fluid necessary for compensation of a thermal stream arising from during cutting.

Keywords: machining processing, cutting of metals, aluminum alloys, cooling fluids, spray, aerosol, aerosol lubrication, cooling, vaporization, thermal stream, ecology.

Эффективность механической обработки определяется точностью, качеством поверхности и экономической целесообразностью. Смазочно-охлаждающие технологические среды (СОТС) способствуют достижению высокой точности размеров и качества поверхности вследствие уменьшения деформации детали в результате выравнивания ее температуры, снижения сил резания, увеличения стойкости инструмента и снижения потребляемой мощности [1]. В свою очередь СОТС увеличивают стоимость механообработки и отрицательно сказываются на экологии процесса. Наряду с расходами на подготовку СОТС нужно учитывать и расходы на поддержание ее в работоспособном состоянии и утилизацию после использования [2, 3]. Дополнительные затраты делают применение СОТС в механической обработке, несмотря на ее достоинства, все более нежелательным. В то же время полный отказ от СОТС невозможен из-за ухудшения качества обработанных деталей. В последние годы одним из направлений сокращения производственных расходов и экологической нагрузки стало применение распыленных СОТС [2, 4].

К примеру, остро стоит вопрос обработки вязких алюминиевых сплавов, обладающих по сравнению со сталью меньшей твердостью, более низким временным сопротивлением и большей теплопроводностью. Выбор оптимальных условий их обработки затруднен из-за сложности учета совместного действия целого ряда факторов. Высокая вязкость алюминиевых сплавов способствует налипанию частиц на рабочие поверхности режущего инструмента. Это затрудняет стружкоотвод, может вызвать пакетирование стружки в канавках инструмента и образование задигов на обработанной поверхности. Высокий коэффициент линейного расширения при нагревании препятствует достижению высокой точности обработки. Процесс наростообразования

у алюминиевых сплавов протекает чрезвычайно активно в связи с повышенной адгезионной активностью алюминия, что диктует необходимость применения СОТС. Используемые в машиностроении СОТС на основе керосина с присадками из соединений хлора, фосфора и других элементов не всегда удовлетворяют санитарно-гигиеническим и противопожарным нормам, а СОТС на водной основе не обеспечивают необходимое качество обработанной поверхности [5]. Необходимое качество обработанной поверхности могут обеспечить только масляные СОТС со специальными присадками, способствующие уменьшению трения и массопереносу. Однако такие СОТС могут значительно повысить стоимость обработки [1, 5].

Анализируя вышесказанное, можно сделать вывод о том, что предотвратить образование нароста на рабочих поверхностях режущего инструмента и сократить расходы можно применением распыленных масляных СОТС. Однако физические свойства распыленных масляных СОТС не позволяют отвести тепловой поток, образующийся при резании, наблюдается интенсивное испарение масла, что недопустимо по санитарно-гигиеническим и противопожарным нормам. С другой стороны, высокая теплота парообразования СОТС на водной основе позволяет отвести тепловой поток, образующийся при резании, но интенсивное наростообразование снижает качество обработанной поверхности. Для объединения положительных качеств этих видов СОТС они должны подаваться в зону резания одновременно. Задача одновременной подачи и дозированного распыления несмешиваемых жидкостей была решена с помощью устройства охлаждения зоны резания [6]. Данное устройство позволяет создавать факел мелкодисперсного аэрозоля.

Для эффективного применения предлагаемого устройства необходима методика оценки охлаждающей способности распыленных СОТС.

При резании с естественным охлаждением уравнение теплового баланса имеет вид

$$Q_o = Q_{c.d.i} + Q_{o.c}, \quad (1)$$

где Q_o – общее количество тепла, образующегося при резании; $Q_{c.d.i}$ – количество тепла, переходящего в стружку, деталь и инструмент; $Q_{o.c}$ – количество тепла, переходящего в окружающую среду.

Идеальным условием охлаждения является отведение всего образующегося тепла в СОТС. Но на практике достижение такого результата невозможно. Часть тепла переходит в инструмент, деталь и стружку.

При резании с применением СОТС (искусственное охлаждение) уравнение теплового баланса имеет вид

$$Q_o = Q_{c.d.i} + Q_{o.c} + Q_{СОТС}, \quad (2)$$

где $Q_{СОТС}$ – количество тепла, которое переходит в СОТС.

При применении в качестве СОТС потока распыленной жидкости охлаждение происходит за счет испарения капель жидкости и теплообмена с потоком воздуха:

$$Q_{СОТС} = Q_{ж} + Q_{в}, \quad (3)$$

где $Q_{ж}$ – количество тепла, которое отводится при испарении жидкости; $Q_{в}$ – количество тепла, которое отводится потоком воздуха.

Количество тепла, переходящее в окружающую среду, по данным ряда исследователей [1, 4], не превышает 1–2 %.

По величине отводимой в СОТС теплоты можно судить об эффективности охлаждения.

Для определения количества тепла, которое переходит в СОТС, необходимо определить:

- количество жидкости, приходящееся на определенный участок охлаждаемой поверхности;
- количество тепла, которое отводится при испарении этого количества жидкости;
- количество тепла, которое отводится потоком воздуха.

Количество тепла, которое отводится при испарении жидкости, определяем из выражения

$$Q_{\text{ж}} = Q_{\text{нагр.ж}} + Q_{\text{испар.ж}} \quad (4)$$

Количество тепла, необходимого для нагревания жидкости до температуры кипения:

$$Q_{\text{нагр.ж}} = c_p m_{\text{ж}} (t_{\text{к}} - t), \quad (5)$$

где c_p – теплоемкость жидкости, Дж/(кг · °С); $t_{\text{к}}$ – температура кипения жидкости, °С; t – начальная температура жидкости, °С; $m_{\text{ж}}$ – масса жидкости, кг.

Количество тепла, необходимого для испарения жидкости:

$$Q_{\text{испар.ж}} = r m_{\text{ж}}, \quad (6)$$

где r – теплота испарения жидкости, Дж/кг.

Суммируя выражения (4) и (5), получаем зависимость для определения количества тепла, отобранного потоком распыленной жидкости при испарении

$$Q_{\text{ж}} = m_{\text{ж}} (c_p (t_{\text{к}} - t) + r). \quad (7)$$

Для определения массы жидкости, поступающей на охлаждаемую поверхность, необходимо определить средний поток распыленной жидкости \bar{q}_F в перпендикулярном сечении факела на расстоянии h (рис. 1):

$$\bar{q}_F = \frac{q_{\text{общ}}}{F_h}, \quad (8)$$

где $q_{\text{общ}}$ – количество жидкости, подаваемой в распыливающее устройство, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$; F_h – площадь факела в перпендикулярном сечении на расстоянии h , м^2 ,

$$F_h = \pi r_{\text{ф}}^2, \quad (9)$$

где $r_{\text{ф}}$ – радиус факела на расстоянии h от сопла, м,

$$r_{\text{ф}} = h \text{tg} \left(\frac{\beta}{2} \right), \quad (10)$$

где $\frac{\beta}{2}$ – половина корневого угла факела (корневой угол β факела определяется техническими характеристиками распыливающего устройства).

Характер рассеивания капель в факеле распыла зависит от конструкции распыливающего устройства. Закон распределения капель жидкости может быть выражен как через кривую плотности распределения, так и через введение поправочных коэффициентов $k_{нр}$, k_a в равномерное распределение капель по сечению факела ($k_{нр}$ – коэффициент радиальной неравномерности, который показывает, насколько удельный поток в контрольном сечении отличается от идеального равномерного распределения; коэффициент окружной неравномерности k_a показывает, насколько факел распыла симметричен относительно его оси) [7].

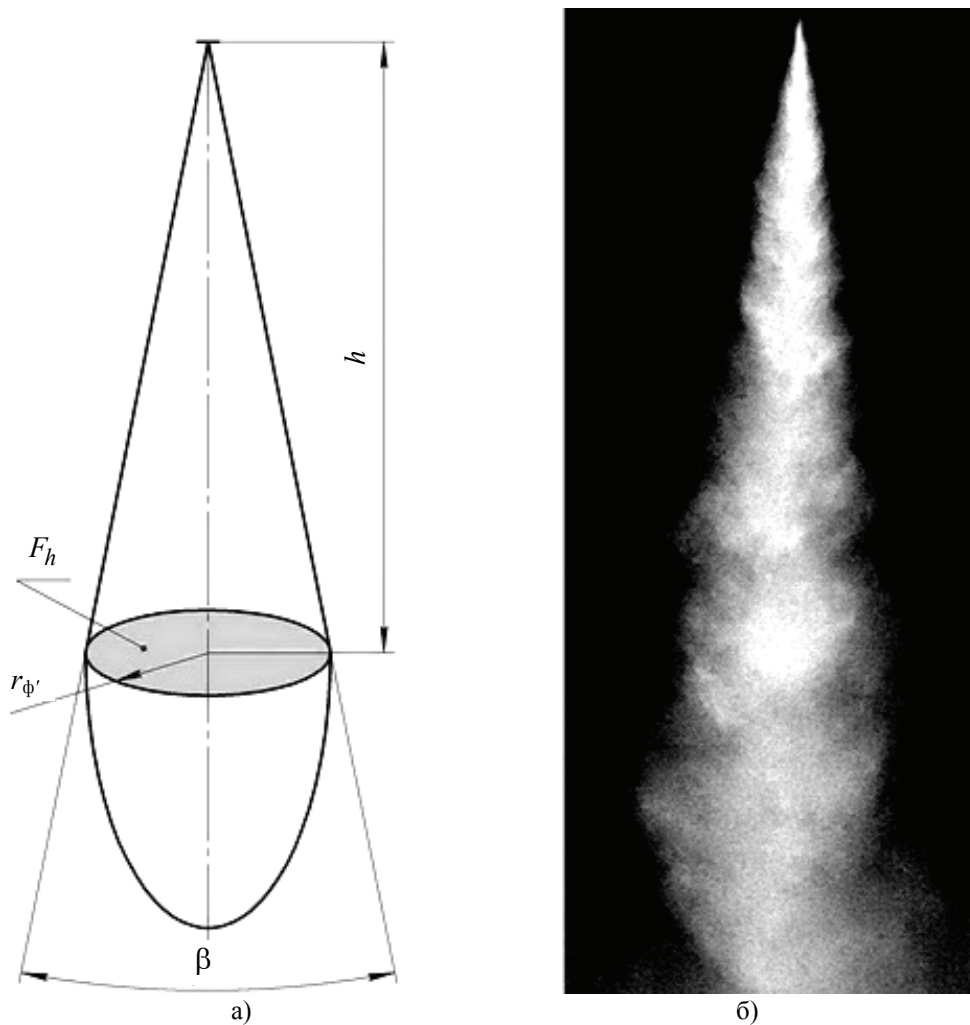


Рис. 1: а – геометрические параметры факела распыленной жидкости;
б – факел распыленной жидкости (вода)

С учетом характера распределения поток распыленной жидкости на определенный участок площадью f будет равен

$$q_f = f \bar{q}_F k_{\text{нр}} k_a. \quad (11)$$

Тогда масса жидкости

$$m_{\text{ж}} = q_f \tau, \quad (12)$$

где τ – время работы распыливающего устройства (с), или

$$m_{\text{ж}} = \frac{f q_{\text{общ}} \tau k_{\text{нр}} k_a}{\pi h^2 \text{tg}^2 \left(\frac{\beta}{2} \right)}. \quad (13)$$

Суммируя выражения (6) и (12), получаем зависимость для определения количества тепла, отобранного потоком распыленной жидкости при испарении:

$$Q_{\text{ж}} = \frac{f q_{\text{общ}} \tau k_{\text{нр}} k_a}{\pi h^2 \text{tg}^2 \left(\frac{\beta}{2} \right)} (c_p (t_{\text{к}} - t) + r). \quad (14)$$

При использовании для охлаждения многокомпонентного аэрозоля выражение (14) приобретает вид

$$Q_{\text{ж}} = \frac{f q_{\text{общ.мнк}} \tau k_{\text{нр}} k_a}{\pi h^2 \text{tg}^2 \left(\frac{\beta}{2} \right)} (c_{po} (t_{\text{к}} - t) + r_o), \quad (15)$$

Где $q_{\text{общ.мнк}}$ – количество многокомпонентной жидкости, подаваемой в распыливающее устройство, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$; c_{po} – теплоемкость многокомпонентной жидкости, Дж/(кг · °С),

$$c_{po} = \sum_{i=1}^n c_{pi} \gamma_i, \quad (16)$$

r_o – теплота испарения жидкости (Дж/кг),

$$r_o = \sum_{i=1}^n r_i \gamma_i. \quad (17)$$

В формулах (16) и (17) γ_i – концентрация i -го компонента в многокомпонентной жидкости; c_{pi} – теплоемкость i -го компонента многокомпонентной жидкости; r_i – теплота испарения i -го компонента многокомпонентной жидкости.

Количество тепла, которое отводится потоком воздуха:

$$Q_{\text{возд}} = f \tau \alpha (t_{\text{п}} - t_{\text{в}}), \quad (18)$$

где α – коэффициент теплоотдачи от поверхности к воздуху, Дж/(м² · с · °С); $t_{\text{п}}$ – температура охлаждаемой поверхности, °С; $t_{\text{в}}$ – температура потока воздуха, °С.

Тогда

$$Q_{\text{СОТС}} = f\tau \left(\frac{q_{\text{общ.мнк}} k_{\text{нр}} k_a (c_{\text{по}}(t_{\text{к}} - t) + r_o)}{\pi h^2 \text{tg}^2 \left(\frac{\beta}{2} \right)} + \alpha(t_{\text{п}} - t_{\text{в}}) \right). \quad (19)$$

Для проверки данной методики проведены экспериментальные исследования, основанные на законе распределения температур в теле при нестационарном теплообмене. Исходя из предпосылки, что эффективность теплоотвода будет определяться величиной градиента температур, в исследованиях величина теплового потока, отводимого СОТС, оценивалась через разность температур в двух точках охлаждаемого тела. Все тепловые потоки от тела ограниченного объема можно привести к результирующим потокам по осям координат Q_x , Q_y , Q_z [8]. При экспериментальном исследовании это требует учета тепловых потоков со всей поверхности тела, что значительно усложняет методику проведения исследования и вносит значительные погрешности в измерения. Для получения большей достоверности исследований предложено использовать тело простой геометрической формы и учитывать тепловой поток только по одной оси координат.

Переход от трехмерного теплового потока к одномерному осуществляется теплоизоляцией поверхности охлаждаемого тела по двум координатным осям. Качество теплоизоляции оценивалось с помощью предварительных экспериментальных исследований скорости охлаждения теплоизолированного тела.

Практически это реализовано следующим образом: в качестве тела выбран цилиндр; в процессе эксперимента охлаждалась торцевая поверхность цилиндра (плоская поверхность с формой, максимально приближенной к форме сечения факела распыленной жидкости); остальная поверхность цилиндра теплоизолировалась. В цилиндре радиально просверлены отверстия: одно на расстоянии 5 мм от охлаждаемой поверхности, другое на расстоянии 15 мм, третье на расстоянии 25 мм (рис 2). В отверстия помещены термопары. Цилиндр нагревали и помещали в теплоизолированный кожух, при этом открытой оставалась только торцевая поверхность цилиндра, которая и охлаждалась распыленной жидкостью. Распределение температур в теле и, следовательно, температурный градиент определяет величину и направление теплового потока. Количество теплоты, проходящей через единицу площади в единицу времени (плотность теплового потока), определяется соотношением (20),

$$q = -\lambda \text{grad} t, \quad (20)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °С); $\text{grad} t$ – градиент температур.

На рис. 3 представлены зависимости теплового потока от температуры охлаждаемой поверхности.

Из полученных результатов следует, что величина теплового потока не постоянна, а зависит от температуры охлаждаемой поверхности. Следовательно, при определении минимально необходимого количества подаваемой в распыливающее устройство жидкости это необходимо учитывать. Непостоянство теплового потока с нагретой поверхности объясняется тем, что меня-

ется способ отвода тепла от поверхности. Так, в зоне I теплообмен происходит за счет конвективного нагрева жидкости, подаваемой на поверхность, и обдува воздухом; в зоне II – за счет интенсивного испарения подаваемой жидкости; в зоне III интенсивность испарительного теплообмена резко снижается из-за того, что попадающие на поверхность капли переходят в сферoidalное состояние, отскакивают от поверхности и уносятся потоком воздуха [10].

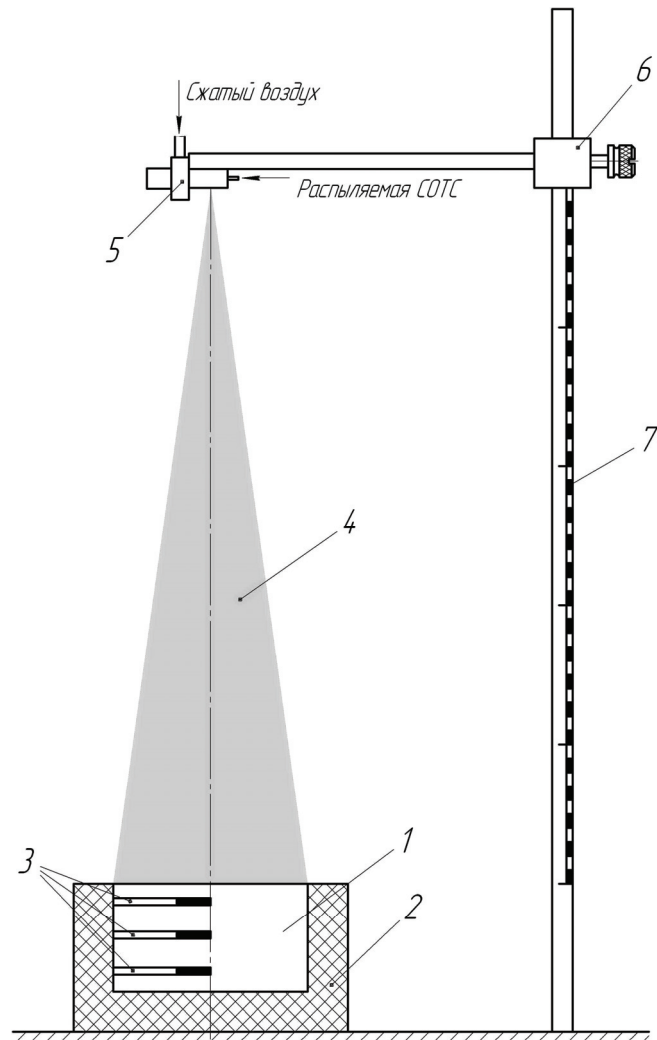


Рис. 2 Схема стенда для исследования величины теплового потока, отводимого распыленными жидкостями: 1 – охлаждаемый образец; 2 – теплоизолирующий кожух; 3 – термопары; 4 – факел распыленной жидкости; 5 – распылитель; 6 – штатив; 7 – измерительная шкала

При лезвийной обработке температура в зоне резания непостоянна и может меняться в широких пределах, поэтому для определения минимально необходимого количества жидкости, подаваемой в распыливающее устройство, были проведены экспериментальные исследования по определению влияния количества подаваемой жидкости на среднюю температуру зоны резания.

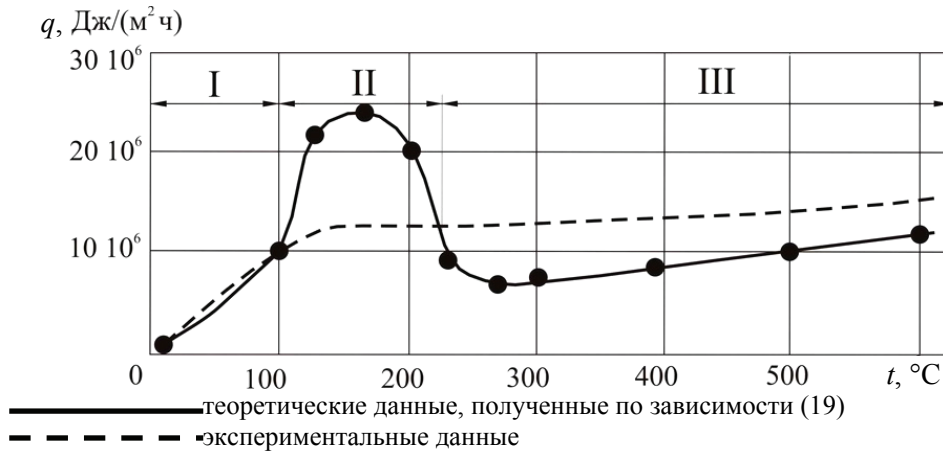


Рис. 3 Зависимость теплового потока от температуры поверхности

Первоначально количество жидкости было определено в предположении, что вся теплота, образующаяся при резании, перейдет в СОТС. Тогда количество подаваемой жидкости будет определяться из выражения

$$q_{\text{общ}} = \frac{Q_{\text{рез}} \pi h^2 \text{tg}^2 \left(\frac{\beta}{2} \right)}{f \tau k_{\text{нр}} k_a (c_p (t_k - t) + r)}. \quad (21)$$

Экспериментальные исследования проводились при продольном течении цилиндрической заготовки из алюминиевого сплава АК6 ГОСТ 4784–97. Температура определялась методом естественной термопары, т.к. она позволяет измерить среднюю температуру в зоне резания [9].

В результате проведенных исследований выявлено следующее:

– средняя температура зоны резания снижается до температуры 120–150 °С и остается на этом уровне, если количество подаваемой жидкости находится в пределах 80–150 % от определенного из выражения (21);

– средняя температура зоны резания снижается до температуры 350–370 °С, если количество подаваемой жидкости менее 80 % от определенного из выражения (21);

– при количестве подаваемой жидкости более 150 % от определенного из выражения (21) средняя температура в зоне резания не опускается ниже 230–250 °С, и наблюдаются скачки температуры до 300–320 °С. Это явление объясняется изменением характера теплообмена. Большое количество жидкости затрудняет процесс испарения, в результате чего теплообмен приобретает конвективный характер, однако количества подаваемой жидкости для эффективного конвективного теплообмена недостаточно и температура в зоне резания остается высокой.

При определении оптимального количества жидкости, подаваемой в распыливающее устройство, с учетом вышеперечисленных зависимостей выражение (21) примет вид

$$q_{\text{мин.общ}} = (0,75 \dots 1,5) \cdot \frac{Q_{\text{рез}} \pi h^2 \text{tg}^2 \left(\frac{\beta}{2} \right)}{f \tau k_{\text{нр}} k_a (c_p (t_k - t) + r)}. \quad (22)$$

Разработанная методика позволяет теоретически оценивать охлаждающую способность распыленных СОТС и оптимизировать необходимое количество распыляемой жидкости. Эта методика учитывает такие параметры, как характер распределения капель по сечению факела, начальную температуру распыленной жидкости, состав распыляемой жидкости и соотношение компонентов аэрозоля.

Список литературы

1. **Трент, Е. М.** Резание металлов / Е. М. Трент ; пер. с англ. Г. И. Айзеншток. – М. : Машиностроение, 1980. – 264 с.
2. **Потапов, В. А.** Применение механической обработки с минимальным количеством СОТС на Германских заводах / В. А. Потапов // Машиностроитель. – 1999. – № 11. – С. 46–52.
3. **Чекалова, Е. А.** Проблемы экологии в металлообрабатывающем комплексе / Е. А. Чекалова // Вестник машиностроения. – 2005. – № 1. – С. 69–70.
4. **Проскуряков, Ю. Г.** Тонкораспыленное охлаждение режущих инструментов / Ю. Г. Проскуряков, В. Н. Петров. – М. : Машгиз, 1962. – 112 с.
5. **Бердичевский, Е. Г.** Смазочно-охлаждающие средства для обработки материалов : справочник / Е. Г. Бердичевский. – М. : Машиностроение, 1984. – 224 с.
6. Способ охлаждения зоны резания и устройство для его осуществления: пат. 2324582 Рос. Федерация: МПК С2 В 23 Q 11/10 / Курносов Н. Е., Николотов А. А. [и др.] Патентообладатель ГОУ ВПО «Пензенский государственный университет». – № 2006115974/02 ; заявл. 10.05.2006 ; опубл. 20.05.2008, Бюл. № 14. – 3 с.
7. **Пажи, Д. Г.** Распылители жидкостей / Д. Г. Пажи, В. С. Галустов. – М. : Химия, 1979. – 216 с.
8. **Эккерт, Э. Р.** Теория тепло- и массообмена / Э. Р. Эккерт, Р. М. Дрейк ; пер. с англ. ; под ред. А. В. Лыкова. – М. : Энергоиздат, 1961. – 681 с.
9. **Ящерицын, П. И.** Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах : учебник для вузов / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Е. Э. Фельдштейн. – Минск : Выш. шк., 1990. – 512 с.
10. **Кремнев, О. А.** Воздушно-водоиспарительное охлаждение оборудования / О. А. Кремнев, А. Л. Сатановский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1967. – 235 с.

Курносов Николай Ефимович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой транспортно-
технологических машин и оборудования,
Пензенский государственный
университет

E-mail: ttmo-pgu@mail.ru

Kurnosov Nikolay Efimovich

Doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of transport
and technological machines and facilities,
Penza State University

Николотов Андрей Александрович

ассистент, кафедра транспортно-
технологических машин и оборудования,
Пензенский государственный
университет

E-mail: nikolotov@mail.ru

Nikolotov Andrey Alexandrovich

Assistant, sub-department of transport
and technological machines and facilities,
Penza State University

УДК 621.7; 621.9

Курносков, Н. Е.

Методика оценки охлаждающей способности распыленных СОТС /
Н. Е. Курносков, А. А. Николотов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 2 (10). – С. 166–175.