

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.01

**Ф. Н. ПРИТЫКИН  
В. И. НЕБРИТОВ**

Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

## ПОСТРОЕНИЕ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ МЕХАНИЗМА РУКИ АНДРОИДНОГО РОБОТА С УЧЕТОМ ПОЛОЖЕНИЯ ЗАПРЕТНЫХ ЗОН

Исследованы форма и положение проекции рабочей зоны механизма руки андроидного робота при различном положении заранее известных препятствий внешней среды. Предложен способ аналитического задания проекций контуров рабочей зоны на основе использования методов аналитической геометрии и теории множеств. Проведенные исследования могут быть использованы при разработке интеллектуальных систем управления андроидными роботами, автономно функционирующими в сложно организованном окружающем пространстве.

**Ключевые слова:** рабочая зона манипулятора, внешняя среда робота, механизм манипулятора, интеллектуальные системы управления роботами.

Разработка 3D виртуальной среды для осуществления возможности моделирования экспериментов, связанных с анализом поведения автономно функционирующих андроидных роботов в организованных средах является одной из важных задач робототехники [1]. Решение указанной задачи взаимосвязано с построением рабочей зоны механизма руки этого робота с учётом заранее известной окружающей

среды. Аналитическое задание рабочей зоны позволяет на начальном этапе реализации движения руки проводить анализ положения целевых точек синтезируемой траектории выходного звена и определять их достижимость [2, 3].

Исследуем влияние запретных зон на рабочую область механизма руки андроидного робота при установке и снятии объектов манипулирования соот-

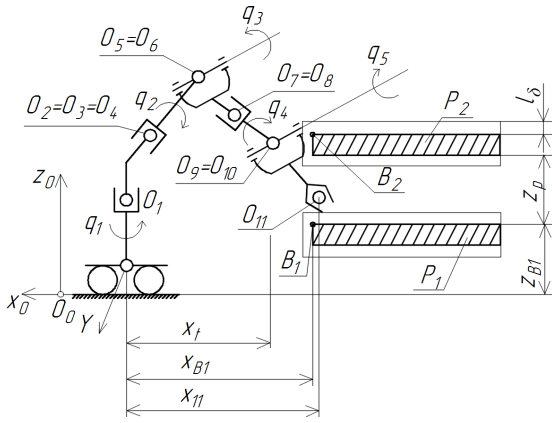


Рис. 1. Взаимное положение механизма руки андроидного робота и стеллажей

ветственно на стеллажи и со стеллажей. На рис. 1 представлены изображения кинематической схемы механизма руки андроидного робота AR-600E и запретные зоны  $P_1$  и  $P_2$ . Данные запретные зоны задают положение стеллажей  $P_1$  и  $P_2$ . На рисунке показана виртуальная безопасная зона толщиной  $l_\delta = 50$  мм, располагающаяся вокруг препятствий. Данная зона в процессе исследований является запретной, при этом пересечение конфигурации руки с данной зоной в результате погрешностей расчётов не приведёт к повреждениям механизма, объекта манипулирования или объектов стеллажей. На рис. 1 точки  $O_1$ ,  $O_2$  и т. д. определяют начала систем координат используемых для задания модели кинематической цепи. Обозначение модели кинематической цепи механизма в соответствии с методикой, принятой в работах [4, 5], будет следующей: МЗ-12-10-12-8-3-12-2-12-3-12-2-12.

Значения обобщенных координат заданных вектором  $q(q_1, \dots, q_5)$  (см. рис. 1) изменяют в заданных пределах и определяют неравенствами:

$$q_i^{\min} \leq q_i \leq q_i^{\max}, \quad (1)$$

где  $q_i^{\min}$ ,  $q_i^{\max}$  — нижние и верхние предельные значений обобщенных координат. Для рассматриваемого примера указанные значения соответственно равны  $q_i^{\min}$  ( $-10^\circ$ ,  $-100^\circ$ ,  $-90^\circ$ ,  $-120^\circ$ ,  $-120^\circ$ ) и  $q_i^{\max}$  ( $10^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $120^\circ$ ). Параметры  $x_i$  и  $x_{11}$  на рис. 1 соответственно определяют заданное безопасное расстояние туловища от стеллажей и минимально

допустимое значение координаты  $x_{11}$ , задающей центр  $O_{11}$  выходного звена (ВЗ). Координаты  $x_{B1}$  и  $z_{B1}$  задают положение базовой точки  $B_1$  запретной зоны  $P_1$ .

Построим множество положений центров захвата (возможные положения точки  $O_{11}$ ), определяющих рабочую зону механизма руки андроидного робота при условии отсутствия пересечения конфигураций руки с запретными зонами. Рабочую зону построим с учётом безопасного расстояния механизма руки до запретных зон  $l_\delta$ . Примем шаг изменения обобщенных координат  $\Delta q_i$ , равный  $5^\circ$ , при построении рабочей зоны.

Блок-схема построения множества положений центра ВЗ (точки  $O_{11}$ ), принадлежащих рабочей зоне, представлена на рис. 2.

На рис. 2 приняты следующие обозначения:

- 1 — ввод данных,  $n$ ,  $q_i^{\min}$ ,  $q_i^{\max}$ ,  $\Delta q_i$ ,  $x_{11}^{\min}$ ,  $x_{B1}$ ,  $z_{B1}$ ,  $z_p$ ;
- 2 — проверка условия  $q_1 < q_1^{\max}$ ;
- 3 —  $q_2 < q_2^{\max}$ ;
- 4 —  $q_3 < q_3^{\max}$ ;
- 5 —  $q_4 < q_4^{\max}$ ;
- 6 —  $q_5 < q_5^{\max}$ ;
- 7 — вычисление  $p_i = 0$  если  $q_i > q_i^{\max}$ , в противном случае  $p_i = 1$ , вычисление  $p_2 = 0$ , если пересечение конфигурации руки с препятствием отсутствует, в противном случае  $p_2 = 1$ ;
- 8 — проверка условия  $p_1 = 0$  (если значения  $q_i$  удовлетворяют предельным значениям обобщенных координат);
- 9 — проверка условия  $p_2 = 0$  (условие пересечения конфигурации с препятствием);
- 10 —  $x_{11} > x_{11}^{\min}$  (где  $x_{11}^{\min}$  — заданные минимально допустимые значения координаты  $x_{11}$ ,  $x_{11}^{\min} = 400$  мм);
- 11 — точка принадлежит сечению рабочей области. Построение изображения данной точки;
- 12 —  $q_5 = q_5 + \Delta q_i$ ;
- 13 —  $q_4 = q_4 + \Delta q_i$ ,  $q_5 = q_5^{\min}$ ;
- 14 —  $q_3 = q_3 + \Delta q_i$ ,  $q_4 = q_4^{\min}$ ,  $q_5 = q_5^{\min}$ ;
- 15 —  $q_2 = q_2 + \Delta q_i$ ,  $q_3 = q_3^{\min}$ ,  $q_4 = q_4^{\min}$ ,  $q_5 = q_5^{\min}$ ;
- 16 —  $q_1 = q_1 + \Delta q_i$ ,  $q_2 = q_2^{\min}$ ,  $q_3 = q_3^{\min}$ ,  $q_4 = q_4^{\min}$ ,  $q_5 = q_5^{\min}$ ;
- 17 — вывод массива координат точек, принадлежащих сечению рабочей зоны.

На рис. 3а представлено изображение рабочей зоны при задании  $z_{B1} = 350$  мм,  $x_{B1} = 400$  мм, на рис. 3б — при  $z_{B1} = 200$  мм,  $x_{B1} = 400$  мм, а на рис. 3в — при  $z_{B1} = 500$  мм,  $x_{B1} = 400$  мм. Параметр  $z_p$  при расчётах принят равным 100 мм. На рис. 3г приведено изображение горизонтальной проекции рабочей

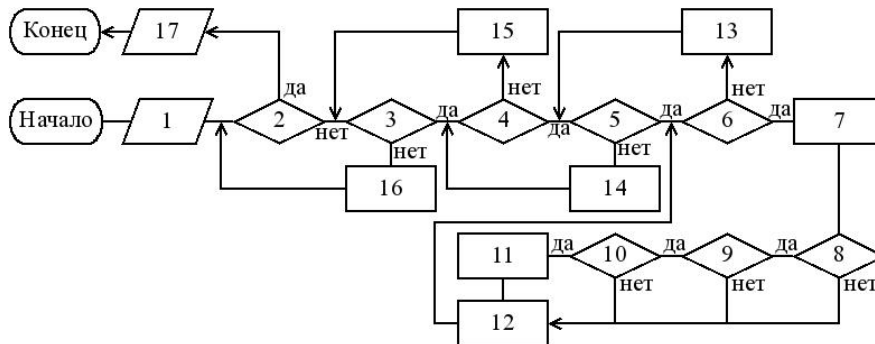


Рис. 2. Алгоритм построения точек, принадлежащих рабочей зоне механизма руки андроидного робота, с учетом положения запретных зон  $P_1$  и  $P_2$

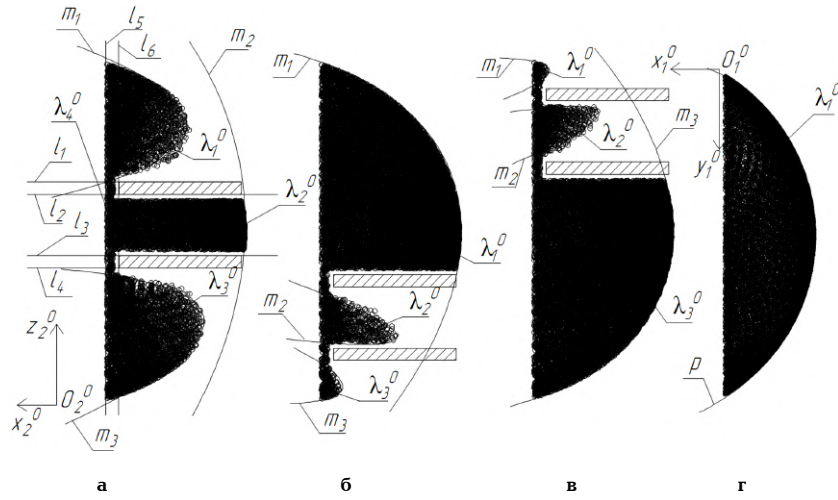


Рис. 3. Изображение рабочей области на фронтальных проекциях:  
 а)  $z_{B1} = 350$  мм,  $x_{B1} = 400$  мм; б)  $z_{B1} = 200$  мм,  $x_{B1} = 400$  мм;  
 в)  $z_{B1} = 500$  мм,  $x_{B1} = 400$  мм;  
 г) изображение рабочей зоны на горизонтальной проекции

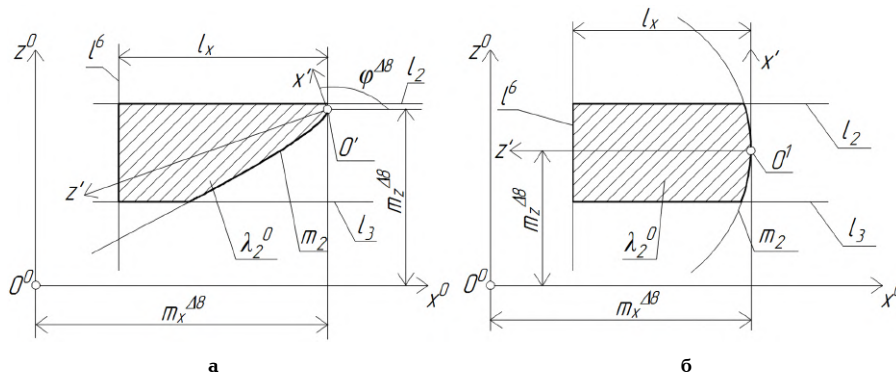


Рис. 4. Аналитическое задание проекции области  $l_2^0$  фрагмента рабочей зоны механизма руки андроидного робота на фронтальной проекции

зоны, которая будет одинакова для всех трёх представленных вариантов рабочей зоны на рис. 3а – в.

С целью определения принадлежности целевых точек задающих конечное положение центра ВЗ на синтезируемых траекториях к рабочей зоне зададим эту зону с использованием теории множеств [6]. Рабочую зону определим в виде пересечения областей  $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_9$  на фронтальной проекции. Области  $\Delta_{1-6}$  (заданные на фронтальной проекции прямыми  $l_1 - l_6$ ) определяют неравенствами вида:

$$-x^0(z_{i-1}^0 - z_i^0) + z^0(x_{i-1}^0 - x_i^0) - x_{i-1}^0 \cdot z_i^0 + x_i^0 \cdot z_{i-1}^0 \geq 0, \quad (2)$$

где  $x_i^0, z_i^0$  и  $x_{i-1}^0, z_{i-1}^0$  — координаты точек, через которые проходят прямые  $l_1 - l_6$ , соответственно  $x^0, z^0$  — координаты текущей точки прямой.

На рис. 3а – в показано, что часть контура изображений рабочей области на плоскости проекций  $O_0z_0x_0$  наилучшим образом определяют кривые, являющиеся параболой. В связи с этим три области на фронтальной проекции  $\Delta_7, \Delta_8$  и  $\Delta_9$  принято определять кривыми  $m_1, m_2$  и  $m_3$  (см. рис. 3а – в).

Неравенства, задающие точки, располагающиеся внутри областей  $\Delta_{7-9}$  имеют следующий вид:

$$(x_0 \cos \varphi^{A7} + z_0 \sin \varphi^{A7} + m_x^{A7})^2 - 2p^{A7}(x_0 \sin \varphi^{A7} + z_0 \cos \varphi^{A7} + m_z^{A7}) \geq 0, \quad (3)$$

$$(x_0 \cos \varphi^{A8} + z_0 \sin \varphi^{A8} + m_x^{A8})^2 - 2p^{A8}(x_0 \sin \varphi^{A8} + z_0 \cos \varphi^{A8} + m_z^{A8}) \geq 0,$$

$$(x_0 \cos \varphi^{A9} + z_0 \sin \varphi^{A9} + m_x^{A9})^2 - 2p^{A9}(x_0 \sin \varphi^{A9} + z_0 \cos \varphi^{A9} + m_z^{A9}) \geq 0,$$

где  $m_x^{A7}, m_y^{A7}, p^{A7}, \varphi^{A7}$  и т. п. — определяют параметры формы и положения кривых  $m_1, m_2$  и  $m_3$ , задающих точки, располагающиеся внутри областей  $\Delta_{7-9}$  (см. рис. 4а, б). Параметры  $m_x^{A7}, m_y^{A7}$  задают центр системы координат  $O'x'z'$  связанной с точкой параболы, имеющей координату  $z'=0$  (см. рис. 4а, б). Параметр  $\varphi^{A7}$  определяет угол наклона оси  $x'$  (определяющий ориентацию параболы) к оси  $x^0$ . Значение  $p^{A7}$  задает положение фокуса параболы. Неравенства (2) получают на основе использования преобразования координат, задающих переход от системы  $O'x'z'$  к системе  $O^0x^0z^0$  (см. рис. 4а, б).

На рис. 4 а, б показано положение трех прямых  $l_2, l_3, l_6$ , кривой  $m_2$  и области  $\lambda_2^0$ , полученной в результате пересечения областей  $\Delta_2, \Delta_3, \Delta_6$  и  $\Delta_8$  при значениях параметров  $z_{B1} = 500$  мм,  $x_{B1} = 400$  мм и  $z_{B1} = 350$  мм,  $x_{B1} = 400$  мм. На рис. 4 значение параметра  $l_x$  определяет максимально удаленную точку области  $\lambda_2^0$  фрагмента рабочей зоны от прямой  $l_1$ .

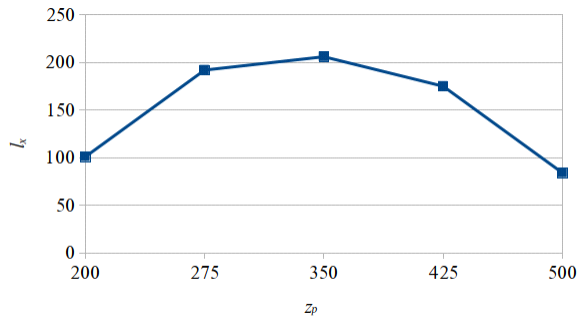


Рис. 5. График функции  $I_x = f(z_{B1})$

Пересечение областей выполним с помощью операций булевой алгебры [6]:

$$\begin{aligned}
 \lambda_1^0 &= \Delta_5 \cap \Delta_7, \\
 \lambda_2^0 &= ((\Delta_2 \cap \Delta_3) \cap \Delta_6) \cap \Delta_8, \\
 \lambda_3^0 &= \Delta_5 \cap \Delta_7, \\
 \lambda_4^0 &= ((\Delta_5 \cap \Delta_6) \cap \Delta_1) \cap \Delta_4.
 \end{aligned} \quad (4)$$

На рис. 5 представлен график  $I_x = f(z_{B1})$  изменения параметра  $I_x$  от значения  $z_{B1}$  при  $z_p = 100$  мм.

Если целевая точка  $B$ , находящаяся между стеллажами (координата которой задана  $x_B^0$ ) не удовлетворяет условию  $(x_B^0 - x_{B1}^0) < I_x$ , то данная точка не может быть достигнута. Если удовлетворяет, необходимо проверить принадлежность данной точки области  $\lambda_2^0$ .

Приведенные результаты исследований могут быть использованы при виртуальном моделировании движения андроидных роботов в заранее известной сложно организованной среде.

## Книжная полка

**Фот, А. Н. Теплообменное оборудование для компрессорных, низкотемпературных и технологических установок: расчет в среде SolidWorks и Ansys : учеб. текстовое электрон. изд. локального распространения : лаб. практикум / А. Н. Фот. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2016. – 1 о=эл. опт. диск (CD-ROM).**

Практикум состоит из пяти лабораторных работ, в которых рассмотрены тепловой и термогазодинамический типы расчета в модуле Flow Simulation, CFN, статический и газодинамический виды анализа в программной среде SolidWorks; предложены варианты для самостоятельной работы студентов, а также пример выполнения работы с иллюстрированными пояснениями. Издание предназначено для студентов, обучающихся по образовательным программам 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», 16.03.03 «Холодильная техника и технологии» дневной, заочной и дистанционной форм обучения.

**Мордвинов, Б. С. Расчет технологических размеров и допусков при проектировании технологических процессов механической обработки : учеб. электрон. изд. локального распространения : учеб. пособие / Б. С. Мордвинов, Е. С. Огурцов. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2016. – 1 о=эл. опт. диск (CD-ROM).**

В учебном пособии изложены практическая методика расчетов, которая может быть применена на производстве при проектировании новых технологических процессов, а также теоретические основы принятого метода: сведения из теории размерных цепей и теории графов. Предназначено для студентов машиностроительных вузов, выполняющих расчеты в процессе курсового и дипломного проектирования.

## Библиографический список

1. Hasegawa T., Suehiro T., Takase K. A model-based manipulation system with skill-based execution // IEEE Trans. Rob. and Autom. 1992. № 5. P. 535–544.
2. Lopatin P. Investigation of a Target Reachability by a Manipulator in an Unknown Environment // IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. 2016. P. 37–42. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7558531/> (дата обращения: 17.06.2016).
3. Лопатин П. К. Исследование достижимости целевых состояний в неизвестной статической среде // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 4. С. 2–6. URL: <http://novtex.ru/mech/mech09/annot04.htm> (дата обращения: 10.02.2009).
4. Притыкин Ф. Н. Виртуальное моделирование движений роботов, имеющих различную структуру кинематических цепей: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 172 с.
5. Притыкин Ф. Н., Небритов В. И. Исследование размеров и формы области в многомерном пространстве обобщенных скоростей, задающей допустимые мгновенные состояния механизма андроидного робота // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2016. № 5 (149). С. 29–34.
6. Рвачев В. Л. Методы алгебры логики в математической физике. Киев, 1974. 256 с.

**ПРИТЫКИН Федор Николаевич**, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры инженерной геометрии и САПР.

Адрес для переписки: [pritykin@mail.ru](mailto:pritykin@mail.ru)

**НЕБРИТОВ Валерий Иванович**, магистрант гр. ИВТм-153 факультета элитного образования и магистратуры.

Адрес для переписки: [vnebritov@gmail.com](mailto:vnebritov@gmail.com)

Статья поступила в редакцию 22.12.2016 г.

© Ф. Н. Притыкин, В. И. Небритов

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК С ОТНОСИТЕЛЬНО ТОЛСТОЙ СТЕНКОЙ, ОБЖИМАЕМЫХ МАТРИЦАМИ С УГЛОМ КОНУСА 50°

Проведены экспериментальные исследования по установлению влияния характеристик инструмента и размеров заготовок на устойчивость цилиндрического необжимаемого участка, обжатых в конических матрицах толстостенных заготовок. Полученные количественные оценки представлены графиками, позволяющими предсказать бездефектное осуществление деформирования при проектировании технологических процессов изготовления штампованных полых изделий с переменным профилем продольного контура.

**Ключевые слова:** обжим, коническая матрица, толстостенная труба, устойчивость.

Получение годных изделий при обжиге в конических матрицах полых цилиндрических заготовок ограничено рядом дефектов, возникающих при деформировании. Они выявлены и описаны, например, в работах [1–3]. Основные дефекты представляют собой потерю устойчивости различными участками обжимаемой заготовки, а именно:

- появление продольных складок в обжимаемом конце (рис. 1а);
- образование поперечных кольцевых выпучиваний в необжимаемой цилиндрической зоне (рис. 1б).

Первый вид не зависит от конструкции инструмента, а второго можно избежать, осуществляя обжим в матрицах с приемной цилиндрической частью — контейнером (рис. 2). Такую схему обжима принято называть «закрытой», а без контейнера — «открытой» [4].

Обе указанные формы потери устойчивости присущи деформированию тонкостенных заготовок. Для обжима толстостенных характерно проявление дефектов только складкообразованием в необжимаемой зоне. Какие они могут иметь формы, показано в работе [4].

В то же время, как указывают исследователи [5], использование матрицы с контейнером, т.е. обжим по «закрытой» схеме, практически исключает возможность потери устойчивости.

Однако применение контейнера не всегда оправдано как с точки зрения конструктивных возможностей, так и с позиций экономической целесообразности.

Во-первых, закрытая высота пресса и штампа не всегда позволяет вписать контейнер требуемого размера; во-вторых, применение контейнера влечет увеличение потребного усилия; в-третьих, наружный диаметр заготовок жестко ограничивается фиксированным диаметром отверстия в контейнере; в-четвертых, штамп с контейнером получается более сложным, что влечет его удорожание. Последние два



а



б

Рис. 1. Формы потери устойчивости при обжиге:  
а — продольные складки в обжатой части;  
б — поперечные кольцевые выпучивания  
в необжимаемой зоне

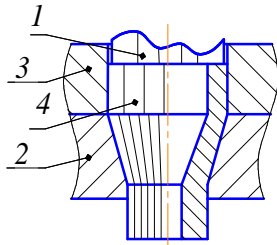


Рис. 2. Схема обжима в матрице с контейнером:  
1 — пуансон; 2 — матрица; 3 — контейнер;  
4 — заготовка

достоинства вызывают очевидные сомнения в выгодности штамповки в таком инструменте изделий малыми партиями.

Нельзя не принять во внимание, что «открытый» обжим может быть технологически осуществим применительно к определенным размерам заготовок и инструмента.

На этом основании следует определить такую область параметров, где деформирование по «открытой» схеме гарантированно будет протекать без потери устойчивости необжимаемым участком.

Такая попытка предпринята в предлагаемой работе экспериментальным путем. Здесь в качестве функционального параметра принято предельное отношение исходных высоты ( $H_{np}$ ) и диаметра ( $D_0$ ) заготовки, при котором не нарушается устойчивость.

Опытное деформирование выполнялось на заготовках из стали 20, марка которой подтверждена проверкой на спектрометре модели ДФС-71 соответ-

ствия химического состава образца, вырезанного из той же горячекатаной трубы, что использована для изготовления заготовок, показателям ГОСТ 1050-2013.

Заранее определились, что все экспериментальные образцы по состоянию микроструктуры будут представлены двумя партиями. К одной отнесены подвергнутые отжигу (температура 920°, время выдержки 60 минут, охлаждение с печью), а другую партию представляли предварительно упрочненные (нагартованные) путем редуцирования в холодном состоянии исходной бесшовной трубы  $\varnothing 42_{-0,1}$  мм и толщиной стенки  $7 \pm 0,1$  мм на  $\varnothing 38 \pm 0,05$  мм и толщину  $7,4 \pm 0,05$  мм. При степени деформации, составившей в среднем 7,5 %, принятое в качестве показателя упрочнения временное сопротивление разрыву  $\sigma_{в'}$  согласно [6], повышается практически на 15 %.

Прежде чем произвести редуцирование трубу разделили на отрезки длиной  $70^{+0,5}$  мм, у которых подготовили поверхность к холодному деформированию нанесением цинко-фосфатного слоя.

Широко распространенная для холодной штамповки химическая технология — фосфатирование позволяет обеспечить надежную пленку, противостоящую контакту деформируемого металла и матрицы.

Неоднократно выполняя обжим в конических матрицах стальных заготовок, один из авторов на личном опыте убедился в высокой надежности фосфатного покрытия. Этот же опыт позволил несколько изменить рекомендации по «схеме технологии подготовки поверхности стальных заготовок»

Таблица 1  
Размеры и состояние исходных образцов, коэффициент обжима

Номер образца	Состояние	Высота, мм	$S_0 / D_0$	Коэффициент обжима
601	упрочнен	76	0,10	1,25
602	упрочнен	76	0,10	1,30
603	упрочнен	60	0,10	1,30
604	упрочнен	60	0,10	1,40
605	упрочнен	50	0,10	1,40
606	упрочнен	40	0,10	1,40
607	упрочнен	76	0,12	1,25
608	упрочнен	76	0,12	1,30
609	упрочнен	76	0,12	1,40
610	упрочнен	60	0,12	1,30
611	упрочнен	60	0,12	1,40
612	упрочнен	50	0,12	1,40
613	отожжен	76	0,12	1,25
614	отожжен	60	0,12	1,25
615	отожжен	50	0,12	1,25
616	отожжен	60	0,12	1,30
617	отожжен	50	0,12	1,30
619	отожжен	60	0,10	1,25
620	отожжен	50	0,10	1,25
621	отожжен	50	0,10	1,30
622	отожжен	40	0,10	1,30
623	отожжен	40	0,10	1,40
624	отожжен	35	0,10	1,40

[7, с. 133], подстроив их к имеющимся в лаборатории условиям.

Во-первых, это касается подготовки и применения раствора для химического обезжиривания: заранее зная, что величина обрабатываемой партии заготовок будет составлять всего несколько десятков единиц (от 50 до 100), состав раствора готовили, исходя из меньшей концентрации компонентов, а время выдержки в растворе заготовок, наоборот, увеличили до 20–30 минут.

Во-вторых, для травления использовали отработанный электролит из автомобильного аккумулятора плотностью 1,10–1,12, согласно показаниям кислотного ареометра. При этом обозначенную в рецептуре присадку марки 4М не использовали за неимением, раствор не подогревали, но время выдержки в нем заготовки соответствовало верхней границе рекомендованного интервала.

В-третьих, по ряду причин, не имея возможности обеспечивать рекомендуемую температуру цинкофосфатного раствора в период обработки образцов, и не будучи лимитированы временем выполнения этой операции, фосфатирование проводили в растворе с комнатной температурой в течение, как правило, 8–12 часов.

Получаемый слой покрытия выдерживал без каких-либо признаков его нарушения двукратное деформирование — сначала при редуцировании, а затем уже непосредственно в процессе обжима.

После редуцирования заготовки, удлинившиеся до 76–76,1 мм, расточили по внутреннему диаметру, обеспечивая заранее принятые толщины стенок: у одной половины партии — 3,8 мм, у другой — 4,6 мм.

Далее половину от всего количества подвергли термической обработке и зафосфатировали, после чего со всех заготовок сняли окончательные размеры.

Измерения выполнены при помощи электронного штангенциркуля (выпущен и поверен «HARDENED» в 2015 г.), имеющего цену деления 0,01 мм.

Формоизменяющим инструментом были матрицы с углом конуса 50° и диаметрами выходного (калибрующего) отверстия, соответствующими коэффициентам обжима ( $K_{об.}$ ) 1,25; 1,30; 1,40.

Выбор угла predetermined более ранними экспериментами, которые показали, что в таком конусе матриц заготовки, обжимаемые с  $K_{об.} = 1,30$  и  $K_{об.} = 1,40$ , теряли устойчивость при  $H_{np.}/D_0 = 2$ .

Сведения о размерах образцов до деформирования, их состоянии, годности или браке в результате штамповки, а также параметрах матриц, в которых соответствующие заготовки были подвергнуты обжиму, показаны в табл. 1.

По мере готовности образцов выполнили их обжим, следуя порядку: если деформирование при текущей длине заготовки заканчивалось потерей устойчивости, то у следующей для обжима в той же матрице длина уменьшалась на 5–15 мм, что производилось до тех пор, пока не получался положительный результат. Отправной точкой начальной длины заготовки для обжима в матрице с большим  $K_{об.}$  принимали максимальную длину, при которой образец не потерял устойчивость в матрице с предыдущим (меньшим)  $K_{об.}$ . В итоге годными оказались образцы под номерами 601, 603, 605, 606, 607, 610, 611, 612, 614, 615, 617, 620, 622, 624.

Обработка полученных результатов экспериментальных исследований позволила предложить их интерпретацию в виде графиков зависимости  $H_{np.}/D_0$

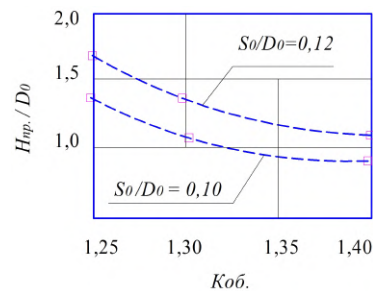


Рис. 3. Графики зависимости предельного отношения исходных высоты ( $H_{np.}$ ) и диаметра ( $D_0$ ) для отоженных образцов

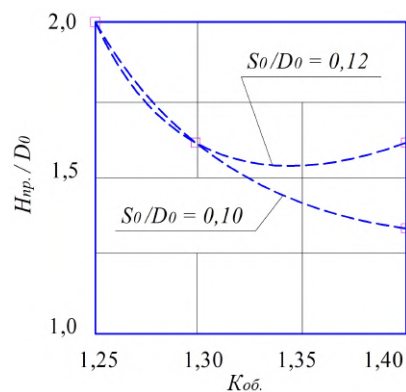


Рис. 4. Графики зависимости предельного отношения исходных высоты ( $H_{np.}$ ) и диаметра ( $D_0$ ) для нагартованных образцов

от  $K_{об.}$  и  $S_0/D_0$  (рис. 3, 4). По характеру распределения контрольных точек в принятых координатах предлагаются ориентировочные кривые, которые в пределах графиков сверху ограничивают зону параметров заготовок и инструмента, отвечающую деформированию обжимом по «открытой» схеме, в пределах которой гарантированно не произойдет потери устойчивости необжимаемой части заготовки.

По итогам выполненной исследовательской работы можно сделать следующие заключения о том, что в пределах принятых параметров деформирующего инструмента (матриц) и заготовок установлено:

1. Предварительно нагартованные заготовки в меньшей степени подвержены потере устойчивости.
2. С увеличением коэффициента обжима устойчивость снижается как для нагартованных, так и для отоженных образцов.
3. Увеличение исходной толщины стенки повышает устойчивость при обжиге.
4. Анализ окончательных размеров годных образцов показывает, что при коэффициентах обжима более 1,25 изделия с конусным переходом в 50° не могут иметь сколько-нибудь значительную длину обжатого цилиндрического хвостовика, если предусматривать необжатый участок, либо, обеспечивая необходимую длину обжатого цилиндрического участка, вынуждены ограничиваться малой (пропорционально исходному диаметру) длиной необжатой части заготовки.

Предлагаемые графики и выводы могут служить в качестве рекомендательного материала, дополняющего сведения о технологических возможностях обжима толстостенных трубных заготовок в конических матрицах. Их практическое применение имеет востребованность при технологической подго-

товке штамповочного производства полых ступенчатых изделий и полуфабрикатов с переходом конической формы в  $50^\circ$  между цилиндрическими участками либо представляющих собой сочетание цилиндрической и конической частей.

#### Библиографический список

1. Аверкиев Ю. А. Определение наибольшей степени деформации при обжиге пустотелых цилиндрических заготовок в конической матрице // Кузнечно-штамповочное производство. 1966. № 11. С. 19–22.
2. Агеев Н. П., Кривицкий А. Г. Анализ устойчивости тонкостенных заготовок при обжиге в конической матрице // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1980. № 1. С. 96–100.
3. Мосин Ф. В. Технология изготовления деталей из труб. М.-Л.: Машгиз, 1962. 172 с.
4. Коновалов В. А., Нельднер В. И., Устинов Д. А. Влияние параметров инструмента на деформацию трубной заготовки

с относительно толстой стенкой при холодном обжиге конической матрицей // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2012. № 2 (110). С. 86–89.

5. Haarsheidt, K. Das Verjungen von Hohlkörpern // Blech Rohre Profile. 1982. 29. № 2. S. 63–67.

6. Третьяков А. В., Зюзин В. И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1973. 224 с.

7. Холодная объемная штамповка: справочник / Под ред. Г. А. Навроцкого [и др.]. М.: Машиностроение, 1973. 495 с.

**КОНОВАЛОВ Валерий Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроения и материаловедения.

**БЕЛОВ Сергей Игоревич**, магистрант гр. Мм-151 факультета элитного образования и магистратуры. Адрес для переписки: mitomd55@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27.12.2016 г.

© В. А. Коновалов, С. И. Белов

УДК 62.144

**Ю. П. МАКУШЕВ**  
**Л. Ю. ВОЛКОВА**

Сибирская государственная  
автомобильно-дорожная академия,  
г. Омск

Калининградский государственный  
технический университет,  
г. Калининград

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ФОРСУНОК ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ ПО ОБЪЕМУ СЛИВАЕМОГО ТОПЛИВА ИЗ ДРЕНАЖНОЙ МАГИСТРАЛИ

Предложена методика, позволяющая по величине утечек топлива из форсунок с гидромеханическим управлением определять зазор между иглой и корпусом распылителя. Для топливной аппаратуры с электрогидравлическим управлением иглы форсунок выполнен расчет топлива, сливаемого через клапан, определены утечки топлива в зависимости от давления в аккумуляторе, величины зазора в распылителе и в паре «управляющий поршень – направляющая». Приведен контроль технического состояния клапанов управления по величине объема сливаемого топлива из штуцера форсунки.

**Ключевые слова:** форсунка, диагностирование, утечки, зазор, клапан управления.

**1. Топливные системы с гидромеханическим управлением хода иглы распылителя форсунки.** Эффективность работы дизеля в основном зависит от форсунок, техническое состояние которых можно определить по анализу объема топлива, сливаемого из дренажной магистрали, по изменению давления в трубопроводе высокого давления и перемещению иглы распылителя.

В процессе работы дизеля часть топлива под действием перепада давления вытекает из камеры распылителя форсунки через зазор между иглой и направляющей. При зазорах в распылителях форсунок более 10 мкм утечки способствуют уменьшению подачи топлива, снижая мощность дизеля.

По величине утечек топлива (диагностический параметр) в эксплуатации можно определить зазор в распылителе и износ направляющей. Для этой цели экспериментальным путем определяют утечки топлива в зависимости от известной величины зазора распылителя. По величине утечек топлива в эксплуатации определяют зазор в распылителе и делается заключение (анализ) о целесообразности его дальнейшей работы.

Для тепловозных и судовых дизелей с высоким остаточным давлением предельный износ распылителей (диаметральный зазор) составляет 6–8 мкм (при уменьшении гидравлической плотности с 20 до 2 с) [1].



Изменение технического состояния форсунок дизеля в эксплуатации

Диагностируемый параметр форсунки	Техническое состояние форсунки		
	Исправное	Неисправное	Отказ
1. Износ пары «игла – корпус распылителя». Начальный зазор (диаметральный) 2 – 4 мкм.	Начальный зазор плюс 3 мкм	Зазор более 8 мкм	Зазор более 10 мкм
2. Нарушение герметичности посадочного конуса иглы и корпуса распылителя.	Сухой носик распылителя	Увлажнение носика распылителя	Образование капель на носике распылителя
3. Зависание иглы распылителя.	Подвижная игла	Потеря подвижности	Игла неподвижная
4. Снижение давления начала открытия иглы от нормативного, например, 34 МПа.	Нормативное значение	Снижение давления на 20 %	Снижение давления более чем на 20 %

В табл. 1 показано изменение конструктивных и регулировочных параметров форсунок дизеля 16ЧН 26/26 в эксплуатации, которые соответствуют исправному, неисправному состоянию или отказу. Главные неисправности распылителя, переходящие в отказ — износ прецизионной пары «игла – корпус распылителя», течь топлива из посадочного конуса, защемление иглы, снижение давления открытия иглы. Для исправного состояния форсунки ее параметры должны соответствовать нормативно-техническим значениям.

На рис. 1 показан разрез форсунки тепловозного дизеля 16ЧН 26/26. Утечки топлива, прошедшие через зазор в распылителе, отводятся из полости форсунки при помощи трубопровода 14. В данной работе оценку величины диаметрального зазора в прецизионной паре «игла – корпус распылителя» предложено определять косвенным путем по объему утечек топлива.

Утечки топлива за цикл (360°) зависят от остаточного давления в линии нагнетания, давления под иглой в полости форсунки, диаметра иглы, зазора в распылителе, длины уплотняющей поверхности корпуса распылителя и динамической вязкости топлива. Система подачи топлива с высоким остаточным давлением более «чувствительна» к изменению зазора в распылителях. При значительной величине остаточного давления в линии нагнетания (например, 10 МПа) топливо вытекает из форсунки в течение всего цикла и достигает значений в несколько раз больше, чем в системах с малым остаточным давлением.

Величина утечек топлива из форсунок определялась расчетным путем. Погрешность расчетных и экспериментальных данных не превышала 7 – 10 %.

Объем утечек топлива через пару «игла – корпус распылителя» в м<sup>3</sup> за время  $\Delta t$  определялся расчетным путем по формулам [2]:

$$V_y = \frac{\pi \cdot d \cdot \delta^3 \cdot \beta}{12 \cdot l \cdot \mu} \cdot \int_{t_1}^{t_2} P_{\phi} \cdot dt, \quad (1)$$

$$V_y = \frac{\pi \cdot d \cdot \delta^3 \cdot \beta}{12 \cdot l \cdot \mu} \cdot P_o \cdot \Delta t, \quad (2)$$

где  $d$  — диаметр иглы, м;  $\delta$  — радиальный зазор, м;  $\beta$  — коэффициент, учитывающий эксцентричное расположение иглы в направляющей (1,1 – 1,2);  $l$  — длина направляющей части иглы, м;  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости топлива, Нс/м<sup>2</sup>;  $P_{\phi}$  — переменное по величине давление в канале фор-

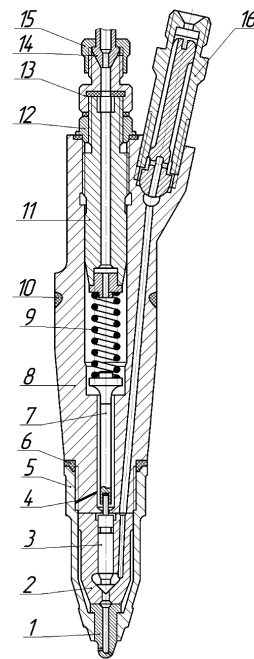


Рис. 1. Форсунка дизеля 16ЧН 26/26:

- 1 — сопловой наконечник; 2 — корпус распылителя;  
3 — игла; 4 — канал; 5 — колпак; 6, 10 — уплотнения;  
7 — штанга; 8 — корпус; 9 — пружина;  
11 — винт регулировочный; 12 — контргайка;  
13 — штуцер; 14 — трубопровод отвода утечек;  
15 — гайка; 16 — штуцер для подвода топлива

сунки в период подачи топлива, Н/м<sup>2</sup>;  $P_o$  — остаточное давление, Н/м<sup>2</sup>.

По формуле (1) определяются утечки в системах подачи топлива без остаточного давления. Время утечек (от  $t_1$  до  $t_2$ ) зависит от продолжительности процесса изменения давления в форсунке (30 – 40° поворота кулачкового вала насоса). По формуле (2) определяются утечки в системах подачи топлива с учетом остаточного давления (давления между впрысками). Топливо дополнительно вытекает через зазор между иглой и корпусом распылителя за период между впрысками (320 – 330°).

Продолжительность времени  $\Delta t$  утечек топлива через зазор в распылителе зависит от величины угла  $\Delta\phi$  (град) и от частоты вращения вала насоса в минуту  $n$ . Для  $\Delta\phi = 40$  град. и  $n = 500$  мин<sup>-1</sup>

$$\Delta t = \frac{\Delta\phi}{6 \cdot n} = \frac{40}{6 \cdot 500} = 0,0133 \text{ с.} \quad (3)$$

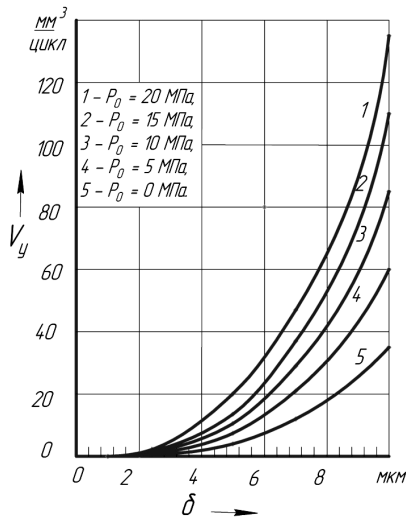


Рис. 2. Изменение утечек топлива за цикл в зависимости от радиального зазора и остаточного давления

На рис. 2 приведены расчетные значения утечек топлива за цикл в зависимости от величины зазора в распылителе форсунки и остаточного давления для тепловозного дизеля 16ЧН 26/26 [3].

В расчетах частота вращения кулачкового вала насоса принята  $500 \text{ мин}^{-1}$ , диаметр иглы 8 мм, длина уплотняющей части распылителя 26 мм, среднее давление в форсунке 50 МПа, продолжительность превышения давления в форсунке над остаточным  $40^\circ$ , динамическая вязкость топлива  $2 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ , кинематическая вязкость  $2,4 \text{ сСт}$  [4].

При радиальном зазоре 5 мкм (диаметральный 10 мкм) утечки топлива из линии высокого давления за цикл равны  $20 \text{ мм}^3$  (остаточное давление 20 МПа, см. рис. 2). Утечки топлива приводят к уменьшению цикловой подачи примерно на такую же величину и снижают эффективную мощность дизеля.

При диаметральном зазоре более 10 мкм центральные оси корпуса распылителя и иглы не совпадают (смещаются), что нарушает герметичность запирающей части конуса. Утечки топлива через посадочный конус приводят к образованию кокса в сопловых отверстиях распылителей и повышают вредные выбросы с отработавшими газами. По этой причине форсунка, у которой распылитель имеет диаметральный зазор более 10 мкм, считается аварийной (неисправность переходит в отказ) и распылитель заменяется новым.

В работе [5] показано, что увеличение диаметрального зазора в распылителе более чем на 13 мкм значительно влияет на протекание процесса впрыска в результате утечек топлива, особенно на режимах пуска и холостого хода.

В последнее время вместо топливных систем с механическим управлением внедряют **аккумуляторные системы** с электронным управлением.

## 2. Топливная система с электрогидравлическим управлением хода иглы распылителя форсунки.

При замене топливной аппаратуры тепловозных дизелей с механическим управлением на электронное необходимо знать их устройство, принцип действия, расчет, эксплуатацию, диагностирование и ремонт. На рис. 3 показан разрез форсунки с электрогидравлическим управлением хода иглы [6]. Пружина 17 через шток якоря 13 прижимает шариковый клапан

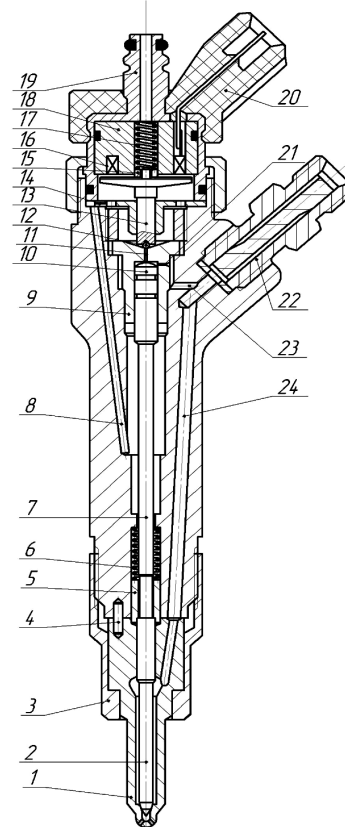


Рис. 3. Форсунка с электрогидравлическим управлением:

- 1 — корпус распылителя; 2 — игла; 3 — гайка;
- 4 — штифт; 5 — втулка; 6 — пружина; 7 — шток;
- 8 — канал отвода утечек; 9 — втулка;
- 10 — управляющий поршень;
- 11 — отсечной жиклёр ( $d_2 = 0,35 \text{ мм}$ );
- 12 — клапан управления; 13 — шток якоря;
- 14 — отверстие для отвода утечек; 15 — втулка;
- 16 — катушка электромагнита; 17 — пружина якоря;
- 18 — сердечник; 19 — штуцер; 20 — разъем питания;
- 21 — наполнительный жиклёр ( $d_1 = 0,35 \text{ мм}$ );
- 22 — штуцер; 23 и 24 — отверстия

управления 12, который закрывает жиклёр (отверстие) 11. Когда клапан 12 находится в закрытом состоянии, то давления топлива в камере управления и в полости под иглой 2 будут равны друг другу. Площадь поршня 10 больше площади иглы 2, поэтому усилие со стороны поршня будет больше, чем со стороны иглы, и она будет находиться в закрытом состоянии.

При подаче напряжения на катушку электромагнита 16 якорь 13 будет притянут к сердечнику 18, сжимая пружину 17. Клапан управления 12 откроется, и топливо через перепускное отверстие будет вытекать из камеры управления, снижая давление над управляющим поршнем 10. Игла 2 под действием высокого давления переместится в верхнее положение и откроет доступ к сопловым отверстиям, обеспечивая начало впрыска топлива. Форсунка данного типа способна изменять угол опережения подачи топлива и характеристику впрыска.

На рис. 4 показана двухфазная характеристика впрыска топлива, рекомендуемая для тепловозных дизелей. Применение данной характеристики в дизеле позволит снизить жесткость процесса сгорания, токсичность отработавших газов и расход топлива. Запальная (предварительная) порция топлива (10–20 %) поступает в камеру сгорания для повышения в ней

температуры и создания вихревого движения воздушного заряда. Основная порция топлива (80–90 %) подается в разогретую камеру, задержка самовоспламенения уменьшается, что снижает жесткость процесса сгорания.

Площадь под кривой представляет собой действительную подачу топлива за цикл. Запальная порция топлива равна  $150 \text{ мм}^3$ , а основная —  $850 \text{ мм}^3$ . Общая подача будет равна  $1000 \text{ мм}^3$ . Продолжительность впрыска топлива составила  $0,006 \text{ с}$  или  $36^\circ$  угла поворота коленчатого вала.

При нарушении герметичности перепускного клапана, увеличении утечек топлива через зазоры «игла — корпус распылителя» и «управляющий поршень — направляющая» характеристика впрыска изменяется, что приводит к уменьшению цикловой подачи, нарушению баллистики топливного факела.

Из отсечного отверстия (жиклера) 11 (см. рис. 3) при его открытии вытекает топливо (для процесса управления) за впрыск объемом, равным

$$V_{\text{пл}} = \mu F_{\text{ж}} \cdot \vartheta_{\text{ж}} \cdot t = \mu F_{\text{ж}} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_T}} \cdot t, \quad (4)$$

где  $\mu F_{\text{ж}}$  — эффективное сечение отсечного жиклера,  $\text{м}^2$ ;  $\vartheta_{\text{ж}}$  — скорость истечения топлива через жиклер,  $\text{м/с}$ ;  $\Delta P$  — средняя величина давления топлива в камере управления,  $\text{Н/м}^2$ ;  $\rho_T$  — плотность топлива,  $\text{кг/м}^3$ ;  $t$  — время впрыска,  $\text{с}$ .

При среднем давлении в камере управления  $\Delta P = 100 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ , плотности топлива  $\rho_T = 850 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu F_{\text{ж}} = 0,076 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  ( $d_2 = 0,35 \text{ мм}$ ,  $\mu = 0,8$ ) и времени  $0,005 \text{ с}$  (для продолжительности впрыска  $15^\circ$  и частоты вращения вала насоса  $500 \text{ мин}^{-1}$ ) объем сливаемого топлива из камеры управления за впрыск составит  $174 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$  или  $174 \text{ мм}^3$ . За 1 минуту форсунка совершает 500 циклов впрыска, и объем сливаемого топлива составит  $87000 \text{ мм}^3$  или  $87 \text{ см}^3$ .

**3. Диагностирование форсунок с электрогидравлическим управлением хода иглы распылителя.** В процессе диагностирования форсунок с электрогидравлическим управлением проверяют герметичность клапана управления. Критерием герметичности клапана (его исправности) и изменение его хода может служить величина объема сливаемого топлива из форсунки. При требуемой герметичности клапанов величина сливаемого топлива из камеры управления каждой из форсунок должна быть одинаковой.

На рис. 5 показана установка, состоящая из мерных емкостей для контроля герметичности клапанов управления. Мерная емкость соединена со штуцером 19 форсунки (см. рис. 3). Объем сливаемого топлива из одной форсунки вместе с утечками при работе двигателя на номинальной частоте вращения коленчатого вала за одну минуту не должен превышать  $150 \text{ см}^3$  [7].

Сливаемое топливо из форсунок с электрогидравлическим управлением хода иглы представляет собой сумму утечек топлива через зазор в распылителе, управляющего поршня и слив топлива, необходимый для процесса управления иглой распылителя.

Разделить экспериментально утечки топлива через зазоры в распылителе и управляющем поршне от общего сливаемого топлива из штуцера форсунки можно путем отключения питания электромагнитного клапана. Давление топлива в аккумуляторе во время отбора утечек должно соответствовать номинальной частоте вращения коленчатого вала двигателя.

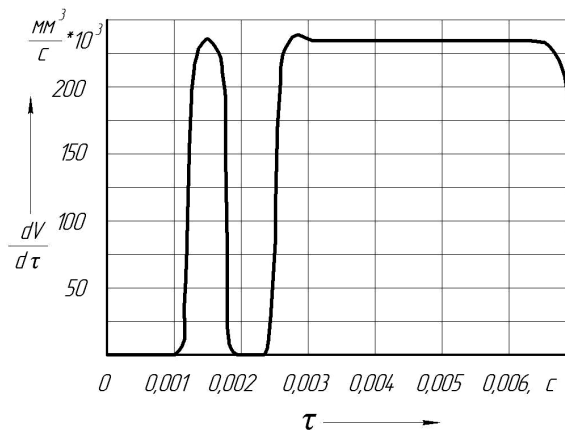


Рис. 4. Характеристика впрыска с предварительной и основной подачей топлива



Рис. 5. Контроль технического состояния клапанов управления по объему сливаемого топлива из штуцера форсунки

Утечки топлива через пару «игла — корпус распылителя» или «управляющий поршень — направляющая» за время  $\Delta t$  определялись по формуле [2]

$$V_y = \frac{\pi \cdot d \cdot \delta^3 \cdot \beta}{12 \cdot l \cdot \mu} \cdot \Delta P \cdot \Delta t, \quad (5)$$

где  $d$  — диаметр иглы или поршня управления,  $\text{м}$ ;  $\delta$  — радиальный зазор,  $\text{м}$ ;  $l$  — длина направляющей части иглы (поршня),  $\text{м}$ ;  $\Delta P$  — давление топлива в полости под иглой и камере управления,  $\text{Н/м}^2$ ; динамическая вязкость топлива  $3 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Диаметр иглы был принят  $8 \text{ мм}$ , управляющего поршня —  $9 \text{ мм}$ , длина уплотняющей части иглы и управляющего поршня —  $26 \text{ мм}$ .

Расчетные значения утечек через прецизионные пары «игла — корпус распылителя» и «управляющий поршень — направляющая» в зависимости от величины зазора и давления приведены в табл. 2 и 3. При диаметральном зазоре  $10 \text{ мкм}$  утечки топлива через зазор в распылителе и управляющем поршне (при давлении  $150 \text{ МПа}$ ) достигают значения, равного  $117,5 \text{ мм}^3$ , что окажет отрицательное влияние на протекание процесса впрыска топлива.

По значению утечек топлива для давления в аккумуляторе от  $50$  до  $200 \text{ МПа}$  определяют зазоры

Таблица 2

Утечки топлива в мм<sup>3</sup>  
за цикл через пару «игла – корпус распылителя»  
в зависимости от величины зазора и давления в аккумуляторе

Давление в аккумуляторе, МПа	Диаметральные зазоры в распылителе, мкм					
	2	4	6	8	10	12
50	0,18	1,44	4,8	11,5	22,5	38,8
100	0,36	2,88	9,6	23,0	45,0	77,6
150	0,54	4,32	14,4	34,5	<b>67,5</b>	116,4
200	0,72	5,76	19,2	46,0	90,0	155,2

Таблица 3

Утечки топлива в мм<sup>3</sup> за цикл  
через пару «управляющий поршень – направляющая»  
в зависимости от зазора и давления в камере управления

Давление в аккумуляторе и среднее в камере управления, МПа	Диаметральные зазоры, мкм					
	2	4	6	8	10	12
50; 33	0,13	1,04	3,5	8,32	16,2	28,0
100; 70	0,28	2,24	7,5	18,0	35,0	60,5
150; 100	0,40	3,2	10,8	25,6	<b>50,0</b>	86,4
200; 135	0,54	4,32	14,6	34,5	67,5	116,6

в парах «игла – корпус распылителя», оценивают их предельную величину и определяют возможность дальнейшей эксплуатации.

Результаты расчета показывают (см. табл. 2 и 3), что при давлении в аккумуляторе 150 МПа, диаметральном зазоре в распылителе и управляющем поршне 10 мкм слив топлива и утечки за одну минуту составят 145 см<sup>3</sup> (87+33+25), что не превышает допустимое значение 150 см<sup>3</sup> [7].

#### Выводы.

1. Предложена методика, позволяющая по величине утечек топлива из форсунок с гидромеханическим управлением определять величину зазора между иглой и корпусом распылителя. Предельный диаметральный зазор в распылителе принят равным 10 мкм.

2. Применение форсунок с электрогидравлическим управлением позволяет организовать двухфазный впрыск топлива с целью снижения расхода топлива, жесткости процесса сгорания, токсичности отработавших газов.

3. Для топливной аппаратуры с электрогидравлическим управлением иглы форсунок выполнен расчет сливаемого топлива через клапан, определены утечки топлива в зависимости от давления в аккумуляторе, величины зазора в распылителе и в паре «управляющий поршень – направляющая».

4. Приведен контроль технического состояния клапанов управления форсунок по величине объема сливаемого топлива из штуцера форсунки.

#### Библиографический список

1. Марденский В. П. Топливная аппаратура судовых дизелей. 2-е изд. М.: Транспорт, 1973. 168 с.

2. Михайлова Л. Ю. Диагностика форсунки дизеля по анализу хода иглы и утечкам топлива // Вестник инновационного Евразийского университета. 2011. № 3 (43). С. 99–105.

3. Волкова Л. Ю. Совершенствование диагностирования технического состояния форсунок тепловозных дизелей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22. 07. Омск, 2014. 19 с.

4. Макушев Ю. П., Михайлова Л. Ю., Филатов А. В. Химмотология: учеб. пособие. Омск: СибАДИ, 2010. 160 с.

5. Роганов С. Г., Макушев Ю. П. Влияние зазора в распылителе форсунки на процесс впрыска и некоторые показатели дизеля // Известия вузов. Машиностроение. 1978. № 1. С. 97–101.

6. Макушев Ю. П. Системы питания двигателей внутреннего сгорания: метод. указания к лабораторным и практическим работам по профилю подготовки «Двигатели внутреннего сгорания». Омск: СибАДИ, 2012. 84 с.

7. Губертус Гюнтер. Диагностика дизельных двигателей / пер. с нем. Ю. Г. Грудского. М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2004. 176 с.

**МАКУШЕВ Юрий Петрович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры тепловых двигателей и автотракторного электрооборудования Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии, г. Омск.

Адрес для переписки: makusev321@mail.ru

**ВОЛКОВА Лариса Юрьевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры судовых энергетических установок и теплоэнергетики Калининградского государственного технического университета.

Адрес для переписки: volkova0969@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14.11.2016 г.

© Ю. П. Макушев, Л. Ю. Волкова

## РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРСУНОК ДИЗЕЛЕЙ С ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

Рассмотрены устройство и принцип действия форсунок с пьезоэлектрическим управлением хода иглы распылителя. Дан пример расчета пьезопривода форсунки, изменение длины которого зависит от напряженности электрического поля, геометрических размеров, коэффициента упругости материала и силы, развиваемой пьезоэлементом. Построен график зависимости толщины пьезоэлемента от величины подводимого напряжения. Даны рекомендации по контролю основных параметров пьезопривода в процессе диагностирования.

**Ключевые слова:** форсунка, управление, пьезопривод, диагностирование, клапан, игла распылителя, впрыск топлива.

**1. Устройство и принцип действия форсунок с пьезоэлектрическим управлением.** Форсунка является главным узлом системы питания дизеля [1]. Она служит для подачи в камеру сгорания распыленного топлива под высоким давлением.

На рис. 1 приведена аккумуляторная система подачи топлива, которая может быть оборудована форсунками с электромагнитным или пьезоэлектрическим управлением хода иглы распылителя.

Из бака 1 топливо при помощи подкачивающего насоса 6 подается через фильтр 7 в головку 3 топливного насоса высокого давления (ТНВД). Величина создаваемого давления ТНВД регулируется клапаном, открытие которого происходит при помощи электромагнита, управляемого блоком 16.

На режиме холостого хода давление топлива регулируют до 40–50 МПа, а на режимах номинальной мощности и близких к нему до 100–200 МПа. Давление, создаваемое насосом, по топливopроводу 5 передается в аккумулятор 9, который соединен при помощи трубопровода высокого давления с форсункой 11. Полость распылителя форсунки и камера управления заполнены топливом под давлением, которое создается в аккумуляторе 9.

В современных дизелях применяют форсунки с гидромеханическим и электрогидравлическим управлением. Форсунки с гидромеханическим управлением не позволяют изменять характеристику впрыска топлива в процессе работы двигателя, что является их главным недостатком.

Применение форсунок с электрогидравлическим управлением позволило изменять угол опережения впрыска и характеристику впрыска. Основным недостатком электромагнитных форсунок является малая скорость подъема якоря (время подъема 0,3–0,4 мс), что обеспечивает только однофазный или двухфазный впрыск топлива.

На рис. 2 приведена характеристика с предварительной (запальной) и основной подачей топлива, полученная с применением форсунок с электрогидравлическим управлением.

Для уменьшения времени подъема (менее 0,1 мс) и увеличения быстродействия клапана рекомендуются форсунки с пьезоэлектрическим управлением [2].

В настоящее время выполняются научные работы по исследованию, доводке и внедрению форсунок с пьезоэлектрическим управлением. Данные форсунки, в отличие от форсунок с электромагнитным управлением, позволяют осуществить за время подачи топлива четыре фазы впрыска. Это обеспечивает более гибкое управление процессом впрыска, снижает расход топлива, уменьшает выброс токсичных веществ с отработавшими газами.

На рис. 3 приведен упрощенный вариант форсунки с пьезоэлектрическим управлением хода иглы [2]. Рассмотрим принцип действия форсунки с пьезоэлектрическим управлением.

При подаче переменного напряжения на пьезопривод 2 происходит его деформация (удлинение). При помощи рычага 4 перемещение пьезопривода передается на шток 5 с запорным конусом (клапан управления). Сливное отверстие 6 открывается, давление в камере управления 15 резко снижается, игла 10 перемещается вверх под действием высокого давления в аккумуляторе 14, открывая сопловые отверстия 11. Начинается процесс подачи топлива. Конструкция и расположение клапана управления может быть различна, но функция одна — изменять величину давления топлива в камере управления.

На рис. 4 показан общий вид форсунки с пьезоэлектрическим управлением хода иглы. Предположим, что давление в аккумуляторе и на входе в форсунку равно 100 МПа. Пьезопривод 3 находится

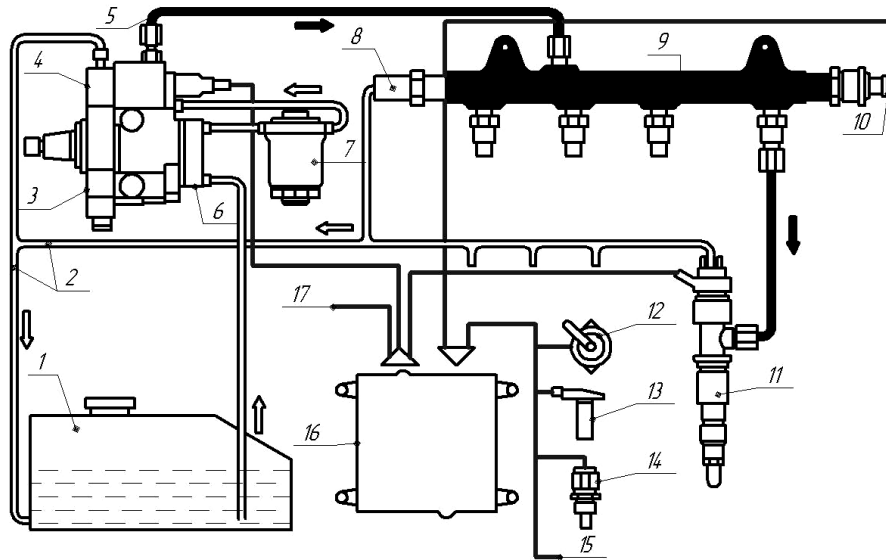


Рис. 1. Системы подачи топлива Common Rail:

- 1 — топливный бак; 2 — сливная магистраль; 3 — ТНВД;  
 4 — регулятор давления; 5 — топливопровод; 6 — подкачивающий насос;  
 7 — фильтр; 8 — предохранительный клапан; 9 — аккумулятор;  
 10 — датчик давления; 11 — форсунка с электрогидравлическим или пьезоэлектрическим управлением;  
 12 — датчик педали акселератора; 13 — датчик частоты вращения коленчатого вала;  
 14 — датчик температуры; 15 — другие датчики; 16 — блок управления;  
 17 — другие исполнительные устройства

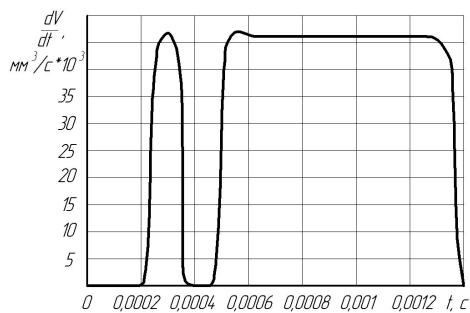


Рис. 2. Дифференциальная характеристика с предварительной и основной подачей топлива

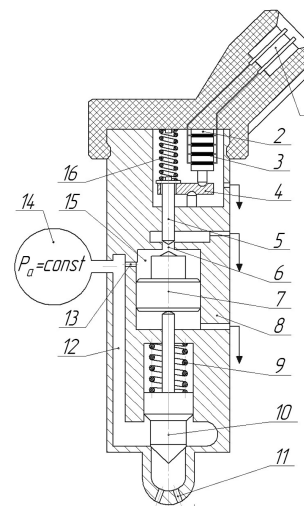


Рис. 3. Форсунка с пьезоэлектрическим управлением:  
 1 — разъем; 2 — пьезопривод; 3 — электрод; 4 — рычаг;  
 5 — шток с запорным конусом; 6 — сливное отверстие;  
 7 — поршень управления; 8 — корпус форсунки;  
 9 — пружина; 10 — игла распылителя;  
 11 — сопловые отверстия; 12 — подводящий канал;  
 13 — канал подвода топлива; 14 — аккумулятор;  
 15 — камера управления; 16 — пружина

в исходном положении, подводимое напряжение равно нулю. Давление топлива, равное 100 МПа, передается через калиброванное отверстие (например, диаметром 0,3 мм) в камеру управления 10 и в полость корпуса распылителя 15. Учитывая, что площадь поршня 11 больше площади направляющей иглы 14, то сила со стороны поршня будет значительно больше, чем со стороны иглы. Игла 14 будет находиться в закрытом состоянии.

При подаче переменного напряжения на пьезопривод 3, который состоит из 200 пластин, он удлиняется, например, на 20 мкм. При помощи рычажного мультипликатора 5 с передаточным отношением, равным пяти, перемещение толкателя 6 составит 100 мкм.

Клапан 8 открывается, часть топлива вытечет из камеры управления 10, давление и сила над поршнем 11 резко уменьшатся. Сила со стороны иглы 14 станет больше, чем сила со стороны поршня 11, игла поднимется вверх, откроет проходное сечение между конусом иглы и седлом, через сопловые отверстия корпуса распылителя 15 начнется подача топлива в камеру сгорания дизеля.

За счет быстрого действия пьезопривода игла способна за время впрыска до четырех раз открыть

и закрыть уплотнение между запорным конусом и седлом.

На рис. 5 показано положение рычажного мультипликатора в рабочем состоянии при максимальном ходе пьезопривода. Мультипликатор — устройство для увеличения передаточного отношения.

На рис. 6 показан впрыск топлива с предварительной, основной и двумя дополнительными фазами, полученный с использованием форсунки с пьезоэлектрическим управлением [3].

В пьезоэлектрическом преобразователе активными элементами являются пластины, изготовленные

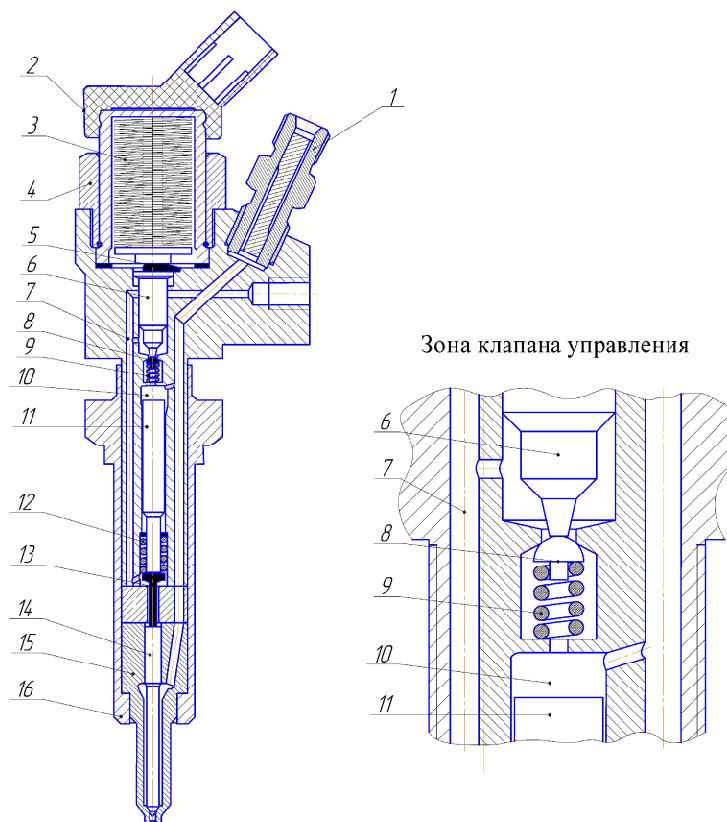


Рис. 4. Общий вид форсунки с пьезоэлектрическим управлением хода иглы:

- 1 — штуцер для подвода топлива из аккумулятора; 2 — разъем электрический; 3 — пьезопривод; 4 — гайка; 5 — рычажный мультипликатор; 6 — толкатель (поршень) клапана; 7 — канал для слива топлива; 8 — клапан переключающий; 9 — пружина клапана; 10 — камера управления; 11 — поршень; 12 — пружина иглы; 13 — толкатель иглы; 14 — игла распылителя; 15 — корпус распылителя; 16 — стакан

из природного кварца или пьезокерамического материала, например, ЦТБС-8 (Цирконат  $ZrO_2$ , титанат бария  $BaTiO_3$ , окись свинца  $PbO$ ) [4]. Принцип действия пьезопривода основан на обратном пьезоэлектрическом эффекте, который заключается в том, что внешнее электрическое поле вызывает механическое напряжение внутри материала, которое приводит к изменению формы кристаллической решетки и росту геометрических размеров.

На рис. 7 показан упрощенный вариант кристаллической решетки пьезоэлемента при отсутствии напряжения (исходное положение) и при подаче напряжения, когда изменение формы кристаллической решетки привело к росту (приращению) геометрических размеров [4].

Изменение высоты пьезоэлемента прямо пропорционально напряжению. Таким образом, можно управлять высотой пьезоэлемента, изменяя напряжение на его обкладках. Управляющее напряжение может изменяться в диапазоне от 100 до 200 В и выше.

При подаче высокого напряжения на элемент (столбик), состоящий, например, из 100 кварцевых пластин, он удлинится (изменяется форма кристаллической решетки). Развиваемое усилие пьезоэлемента площадью  $4 \text{ мм}^2$  достигает 1000 Н и пропорционально площади поперечного сечения элемента. Форма пьезоэлемента может быть круглой, квадратной, прямоугольной.

На рис. 8 приведена схема параллельного включения напряжения питания для пакета, состоящего из 9 пластин. Между пластинами расположены электроды толщиной  $6-12 \text{ мкм}$ , выполненные из серебра. Одна сторона пьезопривода жестко закреп-

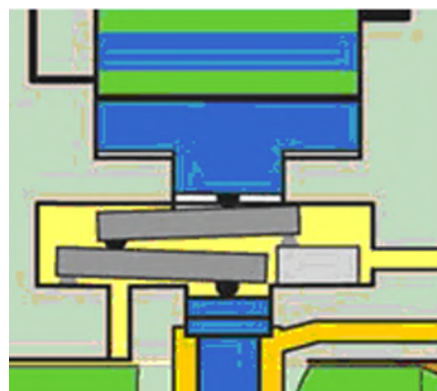


Рис. 5. Рычажный мультипликатор

лена в корпусе форсунки, а вторая сторона способна перемещаться при подаче импульса напряжения. Для перехода пакета пластин в начальное положение изменяют полярность напряжения.

## 2. Расчетное определение основных параметров пьезопривода управления клапаном узлом форсунки.

Исходные данные:

Материал пьезоэлемента — ЦТБС — 8;

$D$  — диаметр пластины пьезоэлемента, 30 мм;

$h_3$  — высота (толщина) пластины пьезоэлемента, 0,5 мм;

$d_{33}$  — осевой пьезомодуль (рабочий диапазон перемещений исполнительного устройства,  $315 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/Н}$ ).

Кулон — единица количества электричества, прохо-

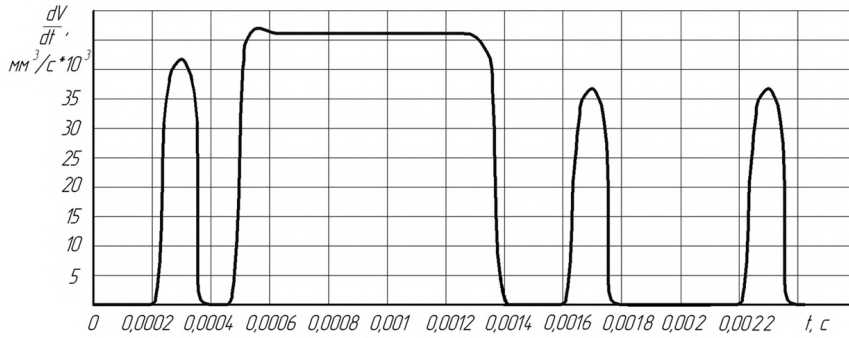


Рис. 6. Характеристика подачи топлива форсункой с пьезоэлектрическим управлением

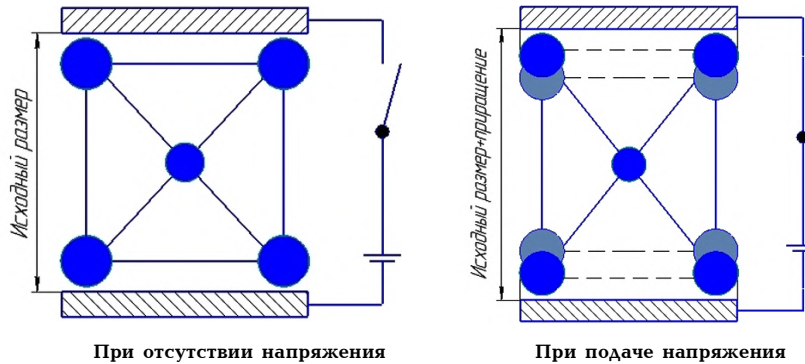


Рис. 7. Изменение формы кристаллической решётки при подаче напряжения

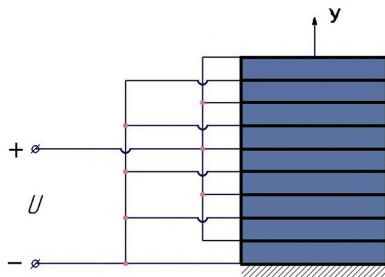


Рис. 8. Схема подвода питания к пьезоприводу

дующего через поперечное сечение проводника при токе силой 1А в течение времени 1 сек. ( $K_{\lambda} = A \cdot c$ );  $U$  — входное управляющее напряжение, 100 В;  $\rho$  — плотность материала пьезоэлемента,  $7,6 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $Y$  — модуль Юнга, определяющий упругие и резонансные свойства материала,  $7,7 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>;  $g_{33}$  — электрическая константа по напряжению в режиме приема,  $25,4 \cdot 10^{-3}$  В·м/Н.

1. Определим площадь одного пьезоэлемента

$$S_{\Pi} = \pi \cdot D^2 / 4 = 3,14 \cdot 3^2 / 4 = 7 \text{ см}^2, (7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2). \quad (1)$$

2. Определим коэффициент упругости (жесткости) из выражения [5]

$$K = S_{\Pi} \cdot Y / h_3 = 7 \cdot 10^{-4} \cdot 7,7 \cdot 10^{10} / 5 \cdot 10^{-4} = 10,78 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}. \quad (2)$$

3. Напряженность электрического поля пьезоэлемента в осевом направлении находим по формуле

$$E_3 = U / h_3 = 100 / 5 \cdot 10^{-4} = 2 \cdot 10^5 \text{ В/м}. \quad (3)$$

4. Сила, развиваемая пьезоэлементом, при подаче электрического напряжения амплитудой 100 В равна

$$F = S_{\Pi} \cdot U / (g_{33} \cdot h_3) = 7 \cdot 10^{-4} \cdot 100 / (25,4 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-4}) = 5559 \text{ Н}. \quad (4)$$

5. Перемещение (увеличение высоты вдоль оси  $y$ ) одного пьезоэлемента в магнитном поле, создаваемое напряжением 100 В будет равно

$$\Delta y = F / K = 5559 / 10,78 \cdot 10^{10} = 515 \cdot 10^{-10} \text{ м}, (515 \cdot 10^{-4} \text{ мкм}). \quad (5)$$

На рис. 9 показано изменение толщины одного пьезоэлемента высотой (толщиной) 0,5 мм, в зависимости от величины подводимого напряжения, выполненного из пьезокерамического материала ЦТБС-8.

Результаты расчета показали, что пьезопластинка толщиной 0,5 мм при подаче управляющего напряжения 100 В изменяет свою высоту на 0,05 мкм. Даже при наборе пьезопривода из 200 пластин общее удлинение составит 10 мкм. Малый ход пьезопривода является главным его недостатком. Данного перемещения недостаточно для эффективной работы (открытия или закрытия) клапана управления. Необходимо перемещение клапана не менее 100 мкм. Для этого нужно повысить управляющее напряжение до 200–300 В или применить рычажный механизм с передаточным числом 5–7.

Электрическая емкость одного элемента,  $C_o$  (Ф) вдоль оси определяется из выражения [4]

$$C_o = \epsilon_{33} \cdot \epsilon_o (1 - K_{эм33}) \cdot S_3 / h_3, \quad (6)$$

где  $\epsilon_{33}$  — диэлектрическая проницаемость вдоль оси, 1500–3000;  $\epsilon_o$  — электрическая постоянная,



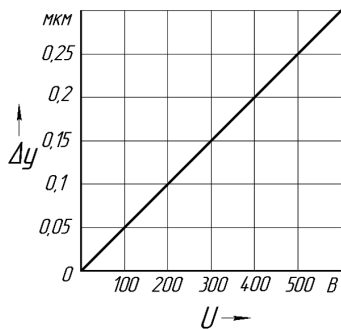


Рис. 9. Изменение толщины пьезоэлемента от величины управляющего напряжения

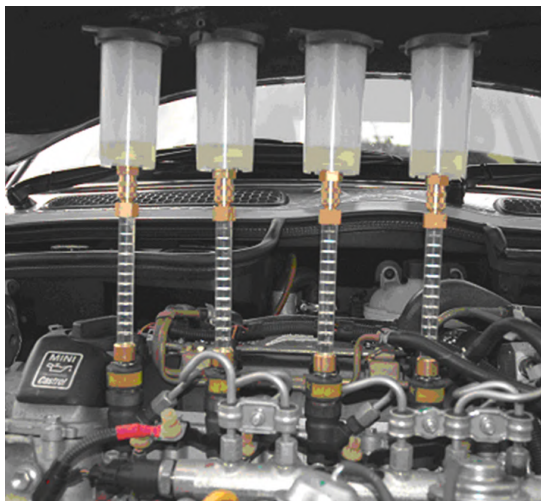


Рис. 10. Контроль технического состояния клапанов управления по объему сливаемого топлива

$8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $S_0$  — площадь двух электродов, разделяющих пьезоэлемент, м<sup>2</sup>.

Коэффициент электромеханической связи  $K_{эмЗЗ}$  характеризует эффективность преобразования электрической энергии, подводимой к материалу, в механическую энергию. Он определяется расчетным путем или принимается равным 0,6–0,7 [4].

$$C_0 = 3000 \cdot 8,75 \cdot 10^{-12} (1 - 0,6) \cdot 14 \cdot 10^{-4} / 5 \cdot 10^{-4} = 29736 \cdot 10^{-12} \text{ Ф или } 26,7 \text{ нФ.} \quad (7)$$

Отметим, что один нанофарад равен  $10^{-9}$  Ф. Пусть пьезоэлемент содержит 200 элементов, тогда общая емкость составит  $26,7 \cdot 200 = 5340$  нФ. В процессе диагностирования значение электрической емкости пьезопривода служит для контроля его технического состояния.

**3. Диагностирование форсунок.** В процессе диагностирования пьезопривода проверяют его перемещение, емкость и величину управляющего напряжения. Пьезопривод форсунки осуществляет перемещение на величину около 20 мкм. Данное малое значение перемещения рекомендуется определять при помощи лазерного интерферометра, который позволяет оценивать перемещение с точностью до 0,05 мкм.

Важным является не только равенство хода клапана (толкателя) во всех форсунках, но и их герметичность. Критерием герметичности клапана управления (его исправности) может служить величина объема сливаемого топлива из форсунки. При требуемой герметичности клапанов величина сливаемого топлива из камеры управления каждой форсунки должна быть одинаковой. Контроль выполняют при номинальной частоте вращения коленчатого вала. Объем сливаемого топлива из форсунки при работе двигателя за одну минуту не должен превышать  $150 \text{ см}^3$  [6].

На рис. 10 показана установка для контроля технического состояния (герметичности) клапанов управления по объему сливаемого топлива из штуцера форсунки.

#### Выводы.

1. Рассмотрены устройство и принцип действия форсунки с пьезоэлектрическим управлением хода иглы распылителя.
2. Дан пример расчета пьезопривода форсунки, изменение длины которого зависит от напряженности электрического поля, геометрических размеров, коэффициента упругости материала и силы, развиваемой пьезоэлементом.
3. Построен график изменения толщины пьезоэлемента от величины управляющего напряжения.
4. Даны рекомендации по контролю основных параметров пьезопривода и клапана управления.

#### Библиографический список

1. Трусов В. И., Дмитриенко В. П., Масляный Г. Д. Форсунки автотракторных дизелей. М.: Машиностроение, 1977. 167 с.
2. Макушев Ю. П. Системы питания двигателей внутреннего сгорания: метод. указания к лабораторным и практическим работам по профилю подготовки «Двигатели внутреннего сгорания». Омск: Изд-во СибАДИ, 2012. 84 с.
3. Уве Роккош. Бортовая диагностика: пер. с нем. М.: ООО «СтарСПб»; ООО Изд-во «За рулем», 2013. 224 с.
4. Бобцов А. А., Быстров С. В., Бойков В. И., Григорьев В. В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений: учеб. пособие. СПб.: ГУ ИТМО, 2011. 131 с.
5. Стрелец А. А. Определение величины перемещения пьезопривода форсунки // Электротехника и электромеханика. 2011. № 6. С. 39–41.
6. Губертус Гюнтер. Диагностика дизельных двигателей / пер. с нем. Ю. Г. Грудского. М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2004. 176 с.

**МАКУШЕВ Юрий Петрович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры тепловых двигателей и автотракторного электрооборудования Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии, г. Омск.

Адрес для переписки: makusev321@mail.ru

**ВОЛКОВА Лариса Юрьевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры судовых энергетических установок и теплоэнергетики Калининградского государственного технического университета.

Адрес для переписки: volkova0969@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14.11.2016 г.

© Ю. П. Макушев, Л. Ю. Волкова

Рубцовский индустриальный  
 институт (филиал)  
 Алтайского государственного  
 технического университета  
 им. И. И. Ползунова,  
 г. Рубцовск

Омский государственный  
 университет путей сообщения,  
 г. Омск

Югорский государственный  
 университет,  
 г. Ханты-Мансийск

## ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ТОЧЕНИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

В статье приводятся результаты теоретической оценки распределения температур при высокоскоростном точении конструкционных сталей. На основе методики описания теплофизических процессов при резании, разработанной Воронцовым А. Л., Султан-Заде Н. М., Албагачевым А. Ю., Савкиным А. И., были получены в явном виде выражения для определения температуры резания, оценки распределения тепловых потоков между образующейся при резании стружкой и передней режущей поверхностью инструмента, а также между его задней поверхностью и контактирующей с ней материалом обрабатываемой заготовки. Для оценки изменения физико-механических свойств материала обрабатываемой заготовки использовалась модель Джонсона—Кука. Расчетные значения температуры резания сопоставлялись с опубликованными в открытой печати данными экспериментов, которые были получены при высокоскоростном точении среднеуглеродистых сталей.

**Ключевые слова:** высокоскоростная механическая обработка сталей, ортогональное точение, модель Джонсона—Кука, температура резания, распределение тепловых потоков при резании.

В процессе механической обработки возникают сложные теплофизические процессы, которые оказывают влияние на изменение физико-механических свойств материалов обрабатываемой заготовки и режущего инструмента, силовые характеристики самого процесса резания, износ режущего инструмента и показатели качества обрабатываемой детали. Это влияние носит многосторонний характер, т.е. образуются своего рода обратные связи в системе «обрабатываемая заготовка — режущий инструмент», что значительно усложняет разработку моделей теплофизических процессов резания и их применение для расчетов температуры резания на практике.

При разработке этих моделей принято выделять три зоны [1, 2], генерирующие тепловые потоки в процессе обработки детали, которые полностью определяют распределение температур в зоне резания, образующейся стружке, режущей части инструмента и заготовке, контактирующей с ним.

По мнению достаточно большого количества авторов работ, посвященных разработке моделей теплофизических процессов резания, ключевым фактором при оценке распределения температур в указанной системе является распределение тепло-

вых потоков между передней поверхностью режущей части инструмента и формируемой в процессе резания стружкой и его задней поверхностью и контактирующим с ней материалом обрабатываемой заготовки. В целом на текущий момент известно десять моделей, характеризующих распределение этих потоков [1] и использующих эмпирические и полуэмпирические коэффициенты.

Эмпирические коэффициенты, как правило, имеют постоянное значение, которое может уточняться в зависимости от соотношения величин теплопроводности материалов обрабатываемой заготовки и режущей части инструмента либо от технологических режимов механообработки. Вследствие этого не всегда существует возможность корректного описания теплофизических процессов при высокоскоростной механообработке (ВСМО), которые отличаются специфическим характером распределения образующихся тепловых потоков между инструментом, стружкой и заготовкой.

Полуэмпирические коэффициенты определяются по зависимостям, иногда достаточно сложной структуры, которые в большей степени отражают как качественное представление о характере распределения тепловых потоков и температур в указанных

зонах, так и субъективный взгляд разработчиков этих моделей на специфику рассматриваемых теплофизических процессов. Данные модели лучше учитывают специфику распределения тепловых потоков при ВСМО, но не все элементы зависимостей для определения коэффициентов носят ясный физический смысл [1].

Следует также отметить, что не менее половины указанных моделей первоначально были разработаны для описания теплофизических процессов, протекающих при взаимном скольжении твердых тел. В дальнейшем они были использованы для описания теплофизических процессов резания, хотя условия протекания последних существенно отличаются. Наряду с этим слабо учитываются влияние на генерацию и распределение тепловых потоков пластической деформации в зоне резания.

В работах Воронцова А. Л., Султан-Заде Н. М., Албагачиева А. Ю., Савкина А. И. [2–5] предложена новая методика описания теплофизических процессов, протекающих при резании. Апробация данной методики для оценки распределения температур при точении различных конструкционных материалов с традиционными режимами резания показала хорошие результаты [4, 5]. В данной статье рассматривается применение указанной методики применительно к высокоскоростному точению конструкционных сталей.

Отличительными особенностями данной методики являются:

- теоретически обоснованные замкнутые решения задачи теплопроводности для линейных неограниченной длины быстро движущихся тепловых источников, полученные в явном виде;

- адекватный учет влияния процессов деформации, протекающих при механической обработке, на формирование и распределение тепловых потоков и температур;

- получение в явном виде зависимостей, характеризующих распределение тепловых потоков и температур в зоне резания, образующейся при резании стружки, режущей части инструмента и заготовке, контактирующей с ней.

Основными допущениями, принятыми при оценке распределения тепловых потоков и температур при высокоскоростном резании, являются следующие. Процесс резания считается установившимся. Колебания режущего инструмента, возникновение которых возможно при ВСМО, при расчетах не учитываются. Обработка осуществляется без использования смазочно-охлаждающей жидкости. Материал обрабатываемой заготовки считается однородным, изотропным и жесткопластичным. Принимается, что деформирование материала обрабатываемой заготовки происходит в условиях, близких к условиям плоской деформации. На сопротивление деформированию материала заготовки  $\sigma_s$  при резании оказывают влияние величина накопленных деформаций  $\epsilon$ , скорость деформации  $\dot{\epsilon}$  и средняя температура в зоне резания  $T$ . По мнению зарубежных и отечественных [6] исследователей для резания, включая и ВСМО, наиболее достоверной является модель Джонсона – Кука:

$$\sigma_s = (A + B\epsilon^n) \left( 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \left( 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right), \quad (1)$$

где  $\epsilon$  — накопленная деформация материала обрабатываемой заготовки;  $\dot{\epsilon}$  — средняя скорость дефор-

мации материала обрабатываемой заготовки в зоне резания;  $T$  — средняя температура материала заготовки в зоне резания;  $T_{пл}$ ,  $T_0$  — температура плавления материала заготовки и его температура, соответствующая  $\dot{\epsilon}_0$  (как правило,  $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}/293 \text{ K}$ );  $\dot{\epsilon}_0$  — скорость деформирования материала заготовки при температуре  $T_0$ ;  $A$ ,  $B$ ,  $n$ ,  $C$ ,  $m$  — коэффициенты, полученные в результате статистической обработки экспериментальных данных исследований прочностных характеристик материала заготовки.

Также считается, что:

- источники тепла, функционирование которых имитирует генерацию тепловых потоков при резании, являются быстро движущимися линейными с неограниченной длиной; плоские (полосовые) источники тепла есть совокупность бесконечного числа быстро движущихся линейных источников с неограниченной длиной;

- стружка, образующаяся при резании, рассматривается как полупространство, неограниченное по длине в направлении, перпендикулярном передней поверхности режущей части инструмента;

- обработанная часть заготовки также рассматривается как полупространство, неограниченное по длине в направлении перпендикулярном задней поверхности инструмента;

- режущий клин (режущая часть) инструмента рассматривается, как бесконечное тело с числом источников теплоты, равным [2]:

$$n_n = \frac{90^\circ - \gamma - \alpha}{90^\circ},$$

где  $\gamma$ ,  $\alpha$  — передний и задний углы режущей части инструмента.

Зависимость для оценки температуры резания  $T$  имеет следующий вид [3, 4]:

$$T = \left( \frac{1}{2T_{ин}} + \frac{1}{\sigma_s F_t} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где  $\sigma_s$  — сопротивление деформированию материала заготовки (1);  $F_t$  — температурный показатель, выражение для которого имеет вид:

$$F_t = \frac{0,15k_{tc,3}k_c}{c\rho \cos\gamma} + \frac{0,226(1 - k_{tc,3})\sqrt{k_c h_1 v_0}}{\sqrt{\lambda c\rho} \cos\gamma} + \frac{1,155k_{л,с}}{c\rho} [u(1 + \mu_1(1 - \text{tg}\gamma)) + \frac{(0,5 + \mu)u}{2k_c} \cos\gamma + \frac{k_c h_1}{4b \cos\gamma}] + \frac{\sqrt{k_c v_0}}{(I_n + I_3)\sqrt{\lambda c\rho}} \left\{ 0,522 \frac{k_{tc,n}}{k_c} \mu_n \sqrt{I_n} + \frac{0,181(1 - k_{tc,3})I_3 \sqrt{h_1}}{\sqrt{\cos\gamma}} \times \left[ \left( \left( 1 + \frac{I_3}{I_2} \right)^{2,5} - 1 \right) \frac{I_2}{I_3} - 2,5 + \frac{2,888\mu_2 k_{tp,3}}{1 - k_{tc,3}} - \left( \frac{I_3}{I_2} + 2,5 \right) \right] \sqrt{\frac{I_3}{I_2}} \right\}. \quad (3)$$

Здесь  $\rho$ ,  $\lambda$ ,  $c$  — плотность, теплопроводность и теплоемкость материала заготовки;  $v_0$  — скорость резания;  $\mu$ ,  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  — коэффициенты контактного

Таблица 1

Скорость резания, м/мин	Экспериментальные данные, °С	Расчетные значения $T$ по методике [1], °С		Расчетные значения $T$ по методике, изложенной в данной статье, °С	
		$T$	$e$ , %	$T$	$e$ , %
197	700	690	1,43	725	3,57
314	750	730	2,67	806	7,47
395	800	760	5,00	847	5,88
565	890	850	4,49	915	2,81
628	920	850	7,61	935	1,63
785	1020	950	6,86	980	3,92
880	1110	980	11,71	1004	9,55
Среднее значение ошибки $e$ , %			5,68		4,97

трения в зоне резания (пластической области) обрабатываемой заготовки, на передней поверхности режущего элемента инструмента за пределами зоны резания и на задней поверхности режущего элемента инструмента соответственно;  $l_3$  — длина контакта материала обрабатываемой заготовки с задней поверхностью режущей части инструмента.

Величины  $b$  и  $h_1$ , характеризующие ширину и глубину резания, определяются выражениями [7]:

$$h_1 = S_{об} \sin \varphi; \quad b = \frac{t_r}{\sin \varphi},$$

где  $S_{об}$  — подача на оборот детали;  $t_r$  — глубина резания.

Длина участка контакта стружки с передней поверхностью режущей части инструмента  $l_n$ , согласно [3], равна:

$$l_n = h_1(1 + k_c),$$

где  $k_c$  характеризует утолщение стружки без учета скоростного и деформационного упрочнения [4]:

$$k_c = u \cos^2 \gamma \{ 2\mu_1(1 - \tan \gamma) + \sqrt{[2\mu_1(1 - \tan \gamma)]^2 + \left[ \frac{4\mu}{u \cos \gamma} + 1 - 2\mu \right] \frac{1}{\cos^2 \gamma}} \}$$

Коэффициент  $u$  характеризует расположение границы контакта области пластической деформации обрабатываемой заготовки на участке ее контакта с передней поверхностью режущего элемента инструмента:

$$u = \begin{cases} 1, & \text{если } \gamma \geq 0, \\ 1 - \sin \gamma, & \text{если } \gamma < 0. \end{cases}$$

Длина границы между стружкой и заготовкой  $l_2$  [4, 7]:

$$l_2 = k_c h_1 / \cos \gamma.$$

Величины  $k_{тс.з}$ ,  $k_{тс.п}$ ,  $k_{тс.л}$  и  $k_{А.с}$  характеризуют распределение тепловых потоков, формирующихся при резании [3, 4]:

—  $k_{тс.з}$  — определяет долю тепловых потоков, поступающих в формируемую при резании стружку на границе ее контакта с заготовкой:

$$k_{тс.з} = (1 + 1,66L)^{-1}; \quad L = \sqrt{ak_c / (v_0 h_1 \cos \gamma)}.$$

—  $k_{тс.п}$  — определяет долю тепловых потоков, поступающих в формируемую при резании стружку в зоне ее контакта с передней поверхностью режущей части инструмента:

$$k_{тс.п} = \left( 1 + \frac{K}{I_{ср.п}} \sqrt{\frac{k_c}{l_n}} \right); \quad K = 2,84 \frac{90^\circ - \gamma - \alpha}{90^\circ} \cdot \frac{\lambda_p}{\sqrt{\lambda_{ср.п}}}.$$

—  $k_{тс.з}$  — определяет долю тепловых потоков, поступающих в заготовку в зоне ее контакта с задней поверхностью режущей части резца:

$$k_{тс.з} = \left( 1 + \frac{K}{I_{ср.з}} \sqrt{l_3} \right)$$

—  $k_{А.с}$  — определяет долю теплоты от деформации материала обрабатываемой заготовки:

$$k_{А.с} = (1 + 2L)^{-1}.$$

Средние величины температурного коэффициента непрерывно действующего плоского источника теплоты для передней  $I_{ср.п}$  и задней  $I_{ср.з}$  поверхностей режущей части инструмента [4]:

$$I_{ср.п} = \ln \left( \frac{m_n + n_n}{m_n - n_n} \right) + 2n_n \ln \left( \frac{n_n}{m_n - 1} \right),$$

$$m_n = \sqrt{1 + n_n^2}, \quad n_n = \frac{b}{2l_n}$$

$$I_{ср.з} = \ln \left( \frac{m_3 + n_3}{m_3 - n_3} \right) + 2n_3 \ln \left( \frac{n_3}{m_3 - 1} \right),$$

$$m_3 = \sqrt{1 + n_3^2}, \quad n_3 = \frac{b}{2l_3}.$$

Практически все экспериментальные исследования распределения температур при резании, проводимые с использованием как термопар/термодатчиков, закрепленных на режущем инструменте, так и современных тепловизионных устройств, дистанционно измеряющих температуры в системе «обрабатываемая заготовка — режущий инструмент», в конечном итоге достоверно измеряют только средние температуры для поверхностей контакта

Таблица 2

Скорость резания, м/мин	Экспериментальные данные, °С [8]	Расчетные значения $T$ [8]		Расчетные значения $T$ по методике, изложенной в данной статье	
		$T$ , °С	$e$ , %	$T$ , °С	$e$ , %
206,4	750	590	21,33	832,7	11,03
330	810	650	19,75	936,5	15,62
Среднее значение ошибки $e$ , %			20,54		13,32

стружки и обрабатываемой заготовки соответственно с передней и задней поверхностями режущей части инструмента. Т.е., как правило, измеряются температуры резания  $T$ . Вследствие этого апробация зависимостей (1–3) проводилась на данных измерений температуры резания для среднеуглеродистых и легированных сталей при ВСМО [1, 8, 9].

В работе [1] приведены данные по обработке стали AISI 4140 (сталь 38ХМ). Скорости резания варьировались от 197 до 880 м/мин (3,3–14,7 м/с) (табл. 1); подача  $S_{об} = 0,1$  мм/об. ( $S_{об} = 0,0001$  м/об.); глубина резания  $t_r = 2,5$  мм ( $t_r = 0,0025$  м).

Теплопроводность стали AISI 4140 (ст. 38ХМ)  $\lambda \approx 42,6$  Вт/(м·°С). Параметры модели Джонсона – Кука для стали AISI 4140:  $A = 598$  МПа;  $B = 768$  МПа;  $C = 0,0137$ ;  $n = 0,2092$ ;  $m = 0,807$ ;  $\dot{\epsilon}_0 = 0,001$  с<sup>-1</sup>.

Обработка осуществлялась без использования смазочно-охлаждающей жидкости инструментом с твердосплавной режущей частью из TCMW 16T304 5015 (российский аналог T15K6) без покрытия. Теплопроводность материала режущей части инструмента  $\lambda_p \approx 27,2$  Вт/(м·°С).

Геометрические характеристики инструмента: угол в плане  $\phi = 45^\circ$ ; передний угол  $\gamma = 0^\circ$ ; задний угол  $\alpha = 7^\circ$ . Измерения температуры резания осуществлялись тепловизором FLIR ThermoCAM SC3000. При расчетах принималось, что коэффициенты трения  $\mu$ ,  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  постоянны и равны 0,3.

В табл. 1 совместно приведены экспериментальные данные измерения температуры резания, результаты ее расчета по методике, представленной в статье [1] и расчетные значения температуры резания по методике, изложенной в данной статье. Точность расчетов оценивалась величиной относительной ошибки  $e$ :

$$e = \frac{|T_{экс} - T_{расч}|}{T_{экс}} \cdot 100 \% \quad (4)$$

В работе [8] приведены данные по обработке стали AISI 1045 (сталь 45). Скорость резания составляла 206,4 м/мин (3,44 м/с) и 330 м/мин (5,5 м/с) (табл. 2); подача  $S_{об} = 0,16$  мм/об. ( $S_{об} = 0,00016$  м/об.); глубина резания  $t_r = 2$  мм ( $t_r = 0,002$  м).

Теплопроводность стали AISI 1045 (ст. 45)  $\lambda \approx 40,2$  Вт/(м·°С). Параметры модели Джонсона – Кука для стали AISI 1045:  $A = 553,1$  МПа;  $B = 600,8$  МПа;  $C = 0,0134$ ;  $n = 0,234$ ;  $m = 0,1$ ;  $\dot{\epsilon}_0 = 1000$  с<sup>-1</sup>.

Обработка осуществлялась без использования смазочно-охлаждающей жидкости инструментом с твердосплавной режущей частью группы применения по ISO P20 без покрытия. Теплопроводность материала режущей части инструмента  $\lambda = 59$  Вт/(м·°С). Геометрические характеристики инструмента:

угол в плане  $\phi = 45^\circ$ ; передний угол  $\gamma = -5^\circ$ ; задний угол  $\alpha = 5^\circ$ .

При расчетах принималось, что коэффициенты трения  $\mu$ ,  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  постоянны и равны 0,5.

В табл. 2 совместно приведены следующие данные:

— экспериментальные данные температуры резания  $T$ , °С [8];

— расчетные значения температуры резания  $T$ , °С, полученные с помощью пакета МКЭ Advant-Edge™ [8];

— расчетные значения температуры резания  $T$ , °С, полученные на основе методики, изложенной в данной статье;

— величина относительной ошибки  $e$ , % (4).

Значения относительной ошибки  $e$ , представленные в табл. 1 и 2, показывают, что расчетные значения температуры резания при высокоскоростном точении среднеуглеродистых и малолегированных сталей, полученные с использованием методики, разработанной Воронцовым А. Л., Султан-Заде Н. М., Албагачиевым А. Ю., Савкиным А. И. для операций резания с традиционными режимами обработки, и модели Джонсона – Кука, описывающей изменения физико-механических свойств материала обрабатываемой заготовки, дают по сравнению с результатами расчетов с использованием популярных пакетов прикладных программ, реализующих метод МКЭ, более точное приближение к соответствующим экспериментальным данным.

#### Библиографический список

1. F. Akbar, P. T. Mativenga, M. A. Sheikh. An evaluation of heat partition models in high speed machining of AISI/SAE 4140 steel. Proceedings of the 6th International Conference on Manufacturing Research (ICMR2008). 9th – 11th September 2008. Brunel University. UK. Vol. 1. P. 13–22.
2. Воронцов А. Л., Султан-Заде Н. М., Албагачиев А. Ю., Савкин А. И. Разработка новой теории тепловых процессов резания. 5. Общий математический аппарат теплофизики резания. Ч. 2 // Вестник машиностроения. 2011. № 1. С. 61–67.
3. Воронцов А. Л., Султан-Заде Н. М., Албагачиев А. Ю., Савкин А. И. Разработка новой теории тепловых процессов резания. 6. Определение температурных полей и контактных температур при резании материалов. Ч. 3 // Вестник машиностроения. 2011. № 5. С. 63–71.
4. Воронцов А. Л., Султан-Заде Н. М., Албагачиев А. Ю., Савкин А. И. Разработка новой теории тепловых процессов резания. 7. Примеры практических расчетов температуры резания. Ч. 1 // Вестник машиностроения, 2011. № 6. С. 72–79.
5. Воронцов А. Л., Султан-Заде Н. М., Албагачиев А. Ю., Савкин А. И. Разработка новой теории тепловых процессов резания. 7. Примеры практических расчетов температуры резания. Ч. 2 // Вестник машиностроения, 2011. № 7. С. 65–72.

6. Залогов В. А., Криворучко Д. В., Хвостик С. Н. О выборе уравнения состояния обрабатываемого материала для моделирования процесса резания методом конечных элементов // Вестник СумДУ. 2006. № 12 (96). С.101–115.

7. Воронцов А. Л., Султан-Заде Н. М., Албагачиев А. Ю. Разработка новой теории резания. Определение основных параметров процесса резания // Вестник машиностроения. 2008. № 6. С. 64–70.

8. Grzesik W., Niesony P.. FEM – based thermal modelling of the cutting process using power law temperature dependent concept // Archives of Materials Science and Engineering. 2008. Vol. 29. Issue 2. P. 105–108.

---

**ШАШОК Александр Васильевич**, кандидат технических наук, декан технического факультета, доцент кафедры «Технология машиностроения» Рубцовского индустриального института (филиал) Алтай-

ского государственного технического университета им. И. И. Ползунова, г. Рубцовск.

Адрес для переписки: avsh04081967@mail.ru

**БРЫЛОВА Татьяна Борисовна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», доцент кафедры «Экономика транспорта, логистика и управление качеством» Омского государственного университета путей сообщения.

Адрес для переписки: biser65@mail.ru

**КУТЫШКИН Андрей Валентинович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии автоматизированных производств», профессор кафедры «Системы обработки информации, моделирования и управления» Югорского государственного университета», Институт (НОЦ) технических систем и информационных технологий.

Адрес для переписки: avk\_200761@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.12.2016 г.

© А. В. Шашок, Т. Б. Брылова, А. В. Кутышкин

## Информация

Омский государственный технический университет  
при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований

### **VII Международная молодежная научно-практическая конференция с элементами научной школы**

#### **«ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА И ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ИНФОРМАТИКА» (ПМиФИ-2017)**

**25 апреля – 04 мая 2017 г.**

Конференция включена в план научно-технических мероприятий ОмГТУ в рамках мероприятий Программы стратегического развития университета.

**Председатель организационного комитета — Косых Анатолий Владимирович**, доктор технических наук, профессор, ректор Омского государственного технического университета, г. Омск.

**Председатель редакционного программного комитета — Евтушенко Юрий Гаврилович**, доктор физико-математических наук, академик РАН, директор ВЦ ФИЦ ИУ РАН, г. Москва.

В состав программного комитета вошли известные российские ученые из Омска, Москвы, Нижнего Новгорода, Казани, Уфы, Екатеринбурга, Новосибирска, Барнаула, Иркутска и ученые из Австралии, Азербайджана, Италии, Мексики, Португалии, Швеции и Черногории.

На конференции планируются лекции приглашенных ведущих российских и зарубежных ученых, секционные и стендовые доклады участников — студентов, аспирантов и молодых исследователей из российских вузов и вузов других стран.

По итогам работы конференции будет издан сборник материалов конференции «Прикладная математика и фундаментальная информатика», который будет размещен в Научной электронной библиотеке eLibrary.ru и включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Материалы докладов, рекомендованные программным комитетом и прошедшие дополнительное рецензирование, будут изданы в периодическом научно-практическом журнале «Прикладная математика и фундаментальная информатика» (ISSN 2311 – 4908), публикации будут размещены в Научной электронной библиотеке eLibrary.ru и включены в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Полная информация на сайте конференции: <http://konfpmfi.omgtu.ru>