МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный технический университет»
(ТвГТУ)

ВЕСТНИК ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия «Технические науки»

Научный рецензируемый журнал
№ 3 (15), 2022

Online ISSN 2687-0029

Тверь 2022

Учредитель: ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»
***Главный редактор*:**Болотов А.Н., д.т.н., профессор ТвГТУ
Заместители главного редактора:
Измайлов В.В., д.т.н., профессор ТвГТУ
Яблонев А.Л., д.т.н., доцент ТвГТУ
Семенов Н.А., д.т.н., профессор ТвГТУ
Ответственный секретарь: Афанасьева Л.Е., к.ф.-м.н., доцент ТвГТУ
Члены редакционной коллегии:
По направлению «Машиностроение и машиноведение»
Гершман И.С., д.т.н., профессор, ВНИИЖТ
Горохов Д.Б., д.т.н., доцент БрГУ
Горячева И.Г., академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, ИПМех РАН
Иванов А.С., д.т.н., профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана
Козырева Л.В., д.т.н., доцент ТвГТУ
Матлин М.М., д.т.н., профессор, ВолгГТУ
Мигранов М.Ш., д.т.н., профессор МГТУ «СТАНКИН»
Солдатенков И.А., д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ИПМех РАН
Хопин П.Н., д.т.н., профессор МАИ
Шоркин В.С., д.ф.-м.н., профессор ОГУ им. И.С. Тургенева
По направлению «Транспортное, горное и строительное машиностроение»
Березовский Н.И., д.т.н., профессор БНТУ, Республика Беларусь
Валиев Н.Г., д.т.н., профессор УГГУ
Головин К.А., д.т.н., профессор ТулГУ
Горлов И.В., д.т.н., доцент ТвГТУ
Кантович Л.И., д.т.н., профессор НИТУ «МИСиС»
Керопян А.М., д.т.н., доцент, главный научный сотрудникООО «МНИПИИТИ»
Кондратьев А.В., д.т.н., профессор ТвГТУ
Рахутин М.Г., д.т.н., доцент НИТУ «МИСиС»
По направлению «Информатика, вычислительная техника и управление»
Бурдо Г.Б., д.т.н., профессор ТвГТУ
Голенков В.В., д.т.н., профессор БГУИР, Республика Беларусь
Мешалкин В.П., академик РАН, д.т.н., РХТУ им. Д.И. Менделеева
Палюх Б.В., д.т.н., профессор ТвГТУ
Шпрехер Д.М., д.т.н., профессор ТулГУ
Язенин А.В., д.ф.-м.н., профессор ТвГУ

Адрес редакции: 170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22.
E-mail: vestnik_tstu_tekh@mail.ru

Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки» публикует научные статьи и краткие обзоры по разделам: «Машиностроение и машиноведение»;«Транспортное, горное и строительное машиностроение»;«Информатика, вычислительная техника и управление». Журнал выходит четыре раза в год.

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер: ЭЛ № ФС77–74961 от 25 января 2019 г. Индексируется в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, по научным специальностям:

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации;

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами;

2.5.3. Трение и износ в машинах;

2.8.8. Геотехнология, горные машины.

© ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

*Измайлов В.В., НовоселоваМ.В.*О влиянии упрочняющей обработки поверхностей трения на ресурс трибосопряжения……...…. 4

Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Влияние магнитного поля на эксплуатационные свойства смазочных сред ……... 12

Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Энергетические свойства поверхностей, смазанных магнитной наносмазкой …….. 18

*Мигранов М.Ш., Исаев Е.В., Мигранов А.М., Мосенз И.И., Гусев А.С., Оплеснин С.С.*Многослойные наноструктурные композиционные покрытия для фрезерования хромоникелевых сплавов……. 25

*Мигранов М.Ш., Мигранов А.М.*Комплексная оценка изнашивания режущих инструментов и композиционных покрытий с эффектом адаптации ……. 30

Архаров А.П. Автоматическая переустановка тонкостенной заготовки на технологическом оборудовании…….. 37

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

*Кондратьев А.В., Кочканян С.М., Лысенко Т.И., Гусаров А.А.*Сравнительная оценка эффективности работы желобообразных валковых сортировок.…..... 42

Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Анализ сил, действующих на частицу фрезерного торфа в зоне всасывающего факела пневмоуборочной машины …… 48

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

*Илясов Л.В.*Мультипеллисторный термохимический детектор для газовой хроматографии……..…… 61

*Матвеев Ю.Н., Чернышев Л.О.*Алгоритм фронтального моделирования в системе анализа и визуализации последствий аварийных выбросов……. 68

*Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Мухина Е.С., Тарасов М.А.*Система оперативного предупреждения о прогаре фурмы доменной печи …….. 78

МАШИНОСТРОЕНИЕИМАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.2.082.18

О ВЛИЯНИИ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ НА РЕСУРС ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯ

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь,наб. Аф. Никитина, 22,e-mail: iz2v2@mail.ru

© Измайлов В.В., Новоселова М.В., 2022

Предложена эмпирическая формула для описания зависимости твердости (микротвердости) материала H от глубины h,являющейся следствием упрочнения при обработке детали или применения упрочняющей технологии. Формула содержит два эмпирических параметра, характеризующих степень упрочнения материала и толщину упрочненного слоя. Предложенная аналитическая зависимость $H(h)$ позволила обобщить известное в трибологии уравнение Дж. Арчарда, связывающее интенсивность изнашивания с твердостью материала изнашиваемой детали, на случай контактирования деталей с переменной по глубине материала твердостью. На основе обобщенного уравнения Арчарда получена формула для количественного прогнозирования ресурса фрикционного сопряжения по критерию допустимого линейного износа. Количественной оценкой ресурса выступает максимальное значение пути трения. Проанализировано влияние параметров упрочненного слоя на оценку величины ресурса фрикционного сопряжения и ее погрешности, возникающей при определении ресурса без учета упрочнения поверхностного слоя. Показано, что эта погрешность может быть существенной, особенно при значительной степени упрочнения.

Ключевые слова: трение, износ, поверхностное упрочнение, ресурс, прогнозирование.

ВВЕДЕНИЕ

Прогнозирование ресурсов современных технических устройств на стадии проектирования и в процессе эксплуатации является актуальной задачей с точки зрения обеспечения их надежности. К таким устройствам относятся, в частности, фрикционные соединения, широко распространенные в современных машинах и механизмах. Большинство узлов трения относится к изделиям с постепенными отказами [1]. Для них критерием исчерпания ресурса служит достижение предельного состояния, количественной характеристикой которого является величина предельного износа. Примерами узлов трения, ресурс которых определяется величиной предельного износа, могут служить зубчатые передачи, опоры скольжения, шлицевые соединения, передачи винт-гайка [2, 3].

Согласно концепции Ю.Н. Дроздова [3], линейную интенсивность изнашивания можно представить как функцию набора безразмерных параметров Φ_i,характеризующих условия эксплуатации, свойства материала и т.п.:

$$I_h = k\Phi_1^a \cdot \Phi_2^b \cdot ..., \quad (1)$$

где $I_h = h/L$;h – линейный износ (толщина изношенного слоя); L – путь трения; k – коэффициент пропорциональности; a, b и т.д. – показатели степени.

К числу основных безразмерных параметров (критериев), характеризующих механическое изнашивание, относятся [2, 3]:

$\Phi_1 = p_n/H$– критерий напряженного состояния контакта, где $p_n = N/A_n$ – номинальное контактное давление; H – твердость (микротвердость) материала; N – нормальная контактная нагрузка; A_n – номинальная площадь контакта. Это основной критерий, применимый к расчетам практически всех видов изнашивания;

$\Phi_2 = \delta/\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}$ – критерий относительной толщины смазочного слоя, где δ – толщина смазочного слоя; R_{a1} и R_{a2} – параметры шероховатости контактирующих поверхностей.

Для приработанных поверхностей уравнение (1) можно записать в виде [2]:

$$I_h = k\Phi_1 = k\frac{p_n}{H}. \quad (2)$$

По сути, уравнение (2)есть не что иное, как преобразованное уравнение Дж. Арчарда, которое используется в трибологии для описания основных видов изнашивания [4–7]:

$$I_V = \frac{V}{L} = k\frac{N}{H}, \quad (3)$$

где I_V – объемная интенсивность изнашивания;V – объем изношенного материала. Очевидно, $V = hA_n$, $N = p_nA_n$, что при подстановке в уравнение (3) превращает его в уравнение (2).

Уравнение (2) позволяет прогнозировать ресурс фрикционного узла в форме предельного пути трения (до достижения предельного состояния):

$$L_{\text{пред}} = \frac{h_{\text{пред}}H}{kp_n}, \quad (4)$$

где $h_{\text{пред}}$ – предельная величина износа. Зная скорость относительного скольжения трущихся поверхностей, легко пересчитать величину ресурса, выраженную в единицах длины, в величину ресурса в единицах времени.

Недостатком уравнения (4) является то, что твердость материала трущихся деталей предполагается постоянной, точнее, не зависящей от глубины (расстояния до поверхности). В большинстве случаев это не выполняется.

Цель данной работы – обобщить уравнения (2) и (4) на случай переменной по глубине материала твердости.

ИЗМЕНЕНИЕ ТВЕРДОСТИ ПО ГЛУБИНЕ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ

Для достижения поставленной цели необходимо прежде всего аналитически описать изменение твердости по глубине материала деталей фрикционного сопряжения.

Для повышения износостойкости деталей узлов трения широко используют различные технологии упрочняющей обработки их рабочих поверхностей: химико-термические, механические, электромеханические, лазерные и т.п. [8, 9]. В результате твердость поверхностных слоев увеличивается. Упрочнение поверхностных слоев может быть следствием механической обработки как таковой, напримерточения, шлифования и т.п. В результате отношение поверхностной твердости к объемной может доходить до 1,5…2,5 раза, а глубина упрочненного слоя достигает 200 мкм [10]. Все вышеизложенное иллюстрируется рис. 1 и 2, на которых представлены зависимости микротвердости поверхностных слоев H от глубины слоя h, построенные на основании данных работы [11].

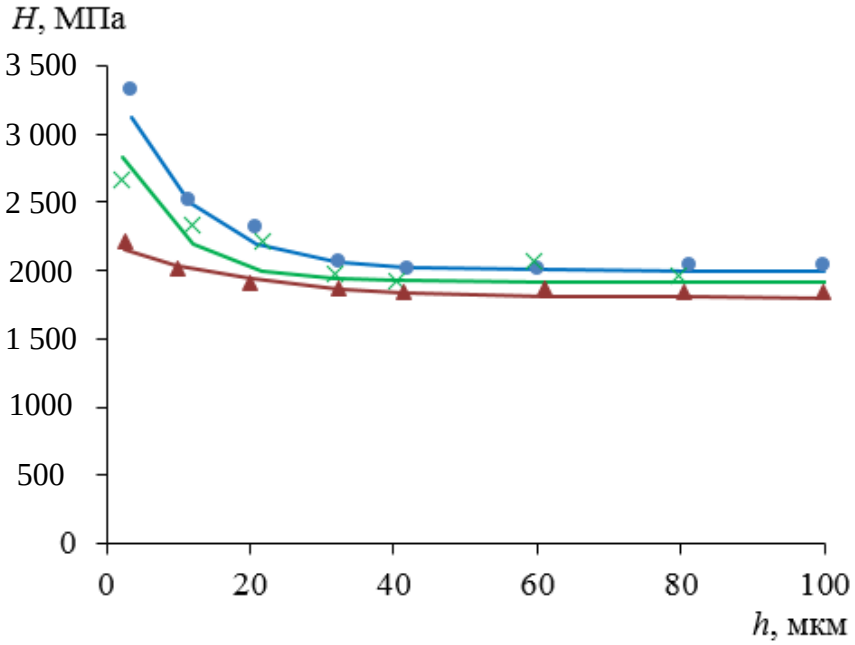


Рис. 1. Зависимость микротвердости поверхностных слоев от глубины слоя для образцов из стали 30ХГСА после электромеханической обработки при различных силах тока: I = 750 А (верхняя кривая); I = 600 А (средняя кривая); I = 450 А (нижняя кривая). Точки – экспериментальные значения [11], линии – аппроксимирующие зависимости по уравнению (5)

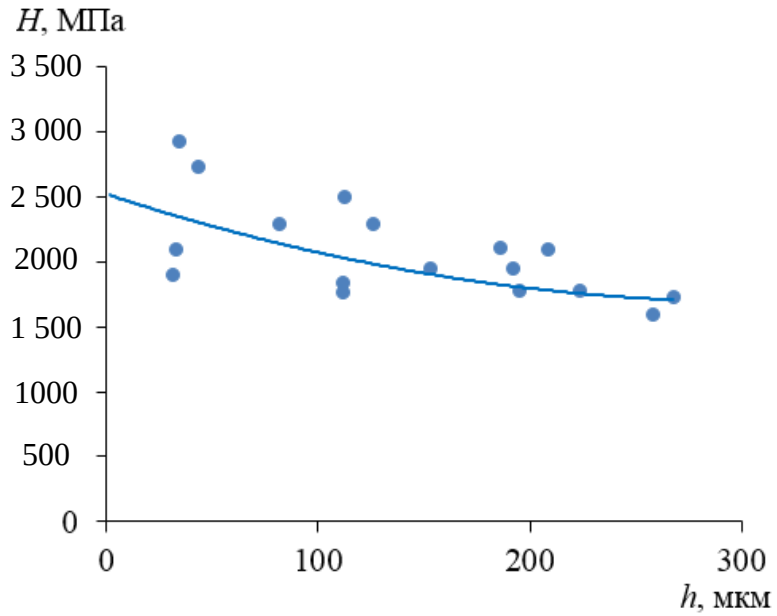


Рис. 2. Зависимость микротвердости поверхностных слоев от глубины слоя для образцов из стали 20 после точения. Точки – экспериментальные значения [11], линия – аппроксимирующая зависимость по уравнению (5)

Большой разброс значений микротвердости на рис. 2 связан с наличием разных структурных составляющих в структуре исследуемой стали [11].

Зависимости $H(h)$, представленные на рис. 1 и 2, и многие другие аналогичные хорошо описываются уравнением вида

$$H(h) = H_0 + H_m e^{-\frac{h}{h_m}}, \quad (5)$$

где H_0 – твердость неупрочненного материала вдали от поверхности; $H_0 + H_m$ – твердость приповерхностных слоев материала; h_m – параметр, характеризующий толщину упрочненного слоя.

Безразмерная величина $\psi = \frac{H_0+H_m}{H_0} = 1 + \frac{H_m}{H_0}$ характеризует степень упрочнения поверхностных слоев. Параметры H_0, H_m, h_m и ψ для зависимостей, представленных на рис. 1 и 2, приведены в таблице.

Параметры зависимости $H(h)$ (см. уравнение (5))

Параметр	Материал, технология и режим обработки			
	Сталь 30ХГСА, электромеханическая обработка			Сталь 20, точение
	I = 750 А	I = 600 А	I = 450 А	
H_0, МПа	2000	1900	1500	1500
H_m, МПа	1600	1200	415	1050
h_m, мкм	10	8	18	160
ψ	1,8	1,6	1,3	1,7

ДИНАМИКА ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ МАТЕРИАЛА С ГРАДИЕНТОМ ТВЕРДОСТИ

Запишем уравнение (2) для бесконечно малого элемента пути трения $dL = vdt$(где v – относительная скорость трущихся поверхностей), на котором толщина изношенного слоя h увеличится на величину dh:

$$\frac{dh}{vdt} = k\frac{p_n}{H(h)}.$$

Подставив в это уравнение зависимость $H(h)$ из уравнения (5), после преобразований получим дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными:

$$\left(H_0 + H_m \mathrm{e}^{-\frac{h}{h_m}}\right) dh = kp_n vdt.$$

Решая последнее с учетом начального условия $h = 0$ при $t = 0$, получаем уравнение, связывающее толщину изношенного слоя h с величиной пути трения $L = vt$:

$$H_0 h + H_m h_m \left(1 - \mathrm{e}^{-\frac{h}{h_m}}\right) = Kp_n L. \qquad (6)$$

Для упрощения дальнейшего анализа приведем уравнение (6) к безразмерному виду, используя относительные переменные $\chi = \frac{h}{h_m}$ (относительная толщина изношенного слоя) и $\Lambda = \left(\frac{kp_n}{H_0}\right)\left(\frac{L}{h_m}\right)$ (безразмерный путь трения):

$$\Lambda = \chi + (\psi - 1)(1 - \mathrm{e}^{-\chi}), \qquad (7)$$

где $\psi = 1 + \frac{H_m}{H_0}$ (см. выше). Зависимость (7) иллюстрируется рис. 3.

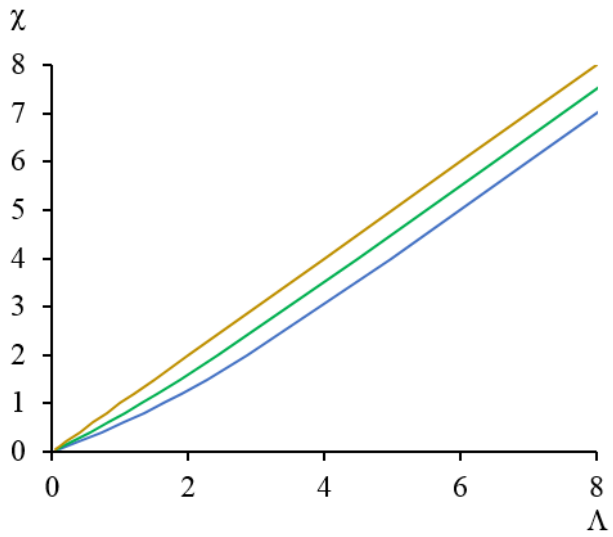


Рис. 3. Зависимость безразмерной толщины изношенного слоя χ от безразмерного пути трения Λ при различных величинах степени упрочнения: ψ = 2 (нижняя кривая); ψ = 1,5 (средняя кривая);верхняя линия – расчет толщины изношенного слоя при постоянной твердости $H = H_0$

Из рис. 3 закономерно следует, что одинаковая величина линейного износа для упрочненной поверхности достигается на большем пути трения, чем для неупрочненной. С другой стороны, на одинаковом пути трения упрочненная поверхность износится меньше, чем неупрочненная, и чем больше степень упрочнения, тем меньше линейный износ.

В абсолютных величинах (например, для стали 30ХГСА после электромеханической обработки при токе 750 А) получаются следующие результаты. Принимая типичные значения $k = 10^{-5}$ и p_n = 1 МПа, а также h_m = 10 мкм и H_0 = = 2 000 МПа из таблицы, получаем h = 60 мкм на пути трения 14 км. Такая же величина линейного износа для неупрочненной поверхности будет достигнута уже на пути трения 12 км.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА ФРИКЦИОННОГО СОПРЯЖЕНИЯ ПО КРИТЕРИЮ ПРЕДЕЛЬНОГО ИЗНОСА

Ресурс фрикционного сопряжения в форме максимального (предельного) пути трения может быть спрогнозирован на основании формулы (6) при $h = h_{\text{пред}}$, где $h_{\text{пред}}$ – величина предельно допустимого линейного износа:

$$L_{\text{пред}} = \frac{1}{k}\left[\frac{H_0}{p_n}h_{\text{пред}} + \frac{H_m}{p_n}h_m\left(1 - \text{e}^{-\frac{h_{\text{пред}}}{h_m}}\right)\right]. \quad (8)$$

Величина предельного износа принимается исходя из назначения фрикционного сопряжения и предъявляемых к нему требований [1]. Например, для уплотнения это может быть величина утечки уплотняемой среды, для направляющих станка – точность обработки, для зубчатых передач – уровень динамических нагрузок и т.п. [1].

Из рис. 3 видно, что игнорирование градиента твердости и расчет ресурса по постоянной величине твердости H_0 приводит к заниженным его оценкам. Это хорошо с точки зрения обеспечения надежности сопряжения, так как уменьшается вероятность отказа изделия в межремонтный период, и плохо с экономической точки зрения, поскольку часть ресурса остается неиспользованной.

Влияние параметров упрочненного слоя – степени упрочнения и его толщины – иллюстрируется рис. 4 и 5. Используются безразмерные величины, как и в уравнении (7). Из рис. 4 следует, что увеличение степени упрочнения пропорционально увеличивает ресурс, при этом чем больше величина предельного износа, тем больше ресурс.

На рис. 5 показано, что ресурс нелинейно растет с ростом величины h_m, характеризующей толщину упрочненного слоя. Безусловно, величина h_m не тождественна последней, но между ними существует пропорциональная зависимость.

Рис. 5 также подтверждает, что с ростом степени упрочнения увеличивается ресурс сопряжения в виде максимального пути трения.

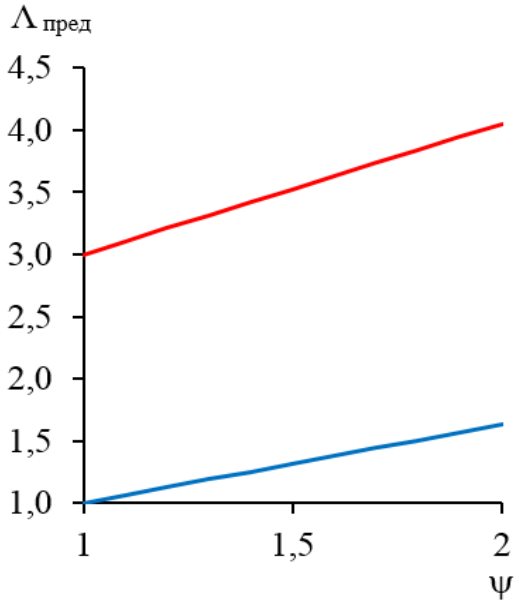


Рис. 4. Зависимость безразмерного максимального пути трения (ресурса) от степени упрочнения поверхности;верхняя кривая –$\chi_{пред} = h_{пред}/h_m = 3$, нижняя – $\chi_{пред} = 1$

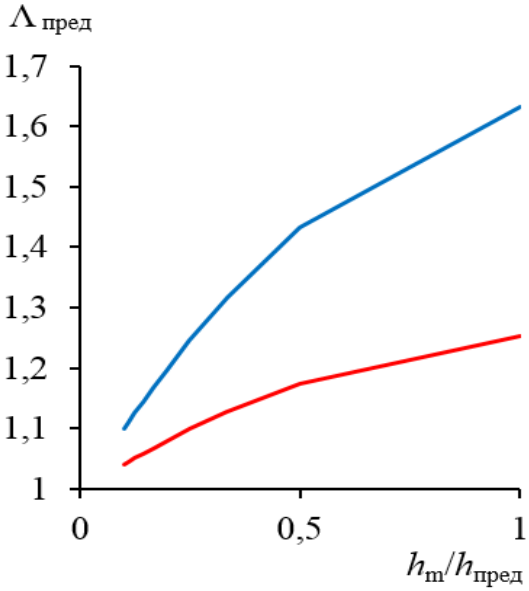


Рис. 5. Зависимость безразмерного максимального пути трения (ресурса) от толщины упрочненного слоя;верхняя кривая – ψ = 2, нижняя – ψ =1,4

В заключение оценим погрешность прогнозирования ресурса фрикционного сопряжения без учета упрочнения поверхностных слоев. Относительная погрешность рассчитывалась по формуле $E = \left(1 - \frac{\Lambda^*_{пред}}{\Lambda_{пред}}\right) \cdot 100\ \%$, где $\Lambda^*_{пред}$ и $\Lambda_{пред}$ – значения максимального пути трения (ресурса) соответственно без учета и с учетом упрочнения поверхностных слоев. Погрешность оценки прогнозирования ресурса в зависимости от относительной величины линейного износа представлена на рис. 6. На начальных

стадиях изнашивания погрешность может быть весьма существенной, затем она снижается. С ростом степени упрочнения поверхности погрешность увеличивается.

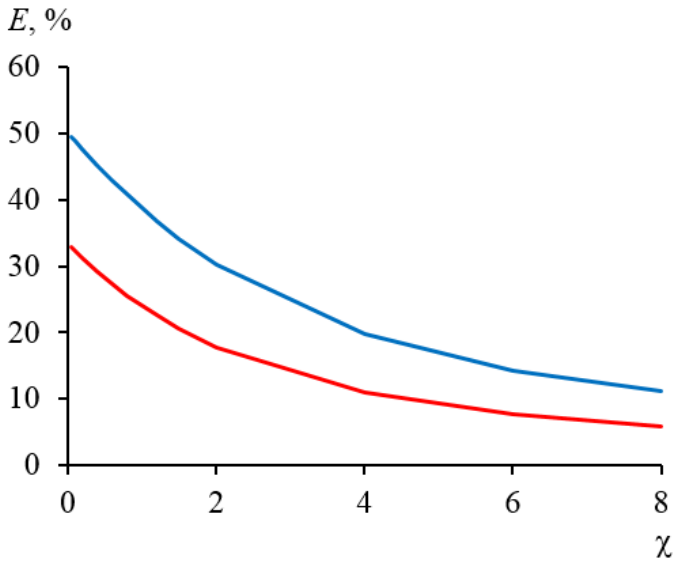


Рис. 6. Зависимость относительной погрешности оценки ресурса фрикционного сопряжения от относительной величины линейного износа; верхняя линия – ψ = 2, нижняя – ψ = 1,5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена аналитическая зависимость, описывающая изменение твердости (микротвердости) H по глубине слоя материала h вследствие упрочнения при обработке детали или вследствие применения упрочняющей технологии. Эмпирическими параметрами этой зависимости являются степень упрочнения и глубина упрочненного слоя.

На основании предложенной аналитической зависимости $H(h)$ известное в трибологии уравнение Дж. Арчарда, связывающее интенсивность изнашивания с твердостью изнашиваемой поверхности, обобщено на случай контактирования деталей с переменной по глубине материала твердостью.

На основании обобщенного уравнения Арчарда получена формула для прогнозирования ресурса фрикционного сопряжения по критерию допустимого линейного износа. Количественной оценкой ресурса выступает максимальное значение пути трения. Исследовано влияние параметров упрочненного слоя на оценку величины ресурса фрикционного сопряжения.

Проведен анализ погрешности оценки ресурса фрикционного сопряжения, выполненной без учета упрочнения поверхностного слоя трущихся деталей. Установлено, что эта погрешность может быть существенной, особенно при значительной степени упрочнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горленко О.А., Тихомиров В.П., Бишутин Г.А. Прикладная механика: триботехнические показатели качества машин. М.: Юрайт, 2017. 264 с.

2. Доценко А.И., Буяновский И.А. Основы триботехники: учебник. М.: ИНФРА-М, 2014. 336 с.

3. Дроздов Ю.Н. Прогнозирование изнашивания с учетом механических, физико-химических и геометрических факторов // Современная трибология: Итоги и перспективы. М.: ЛКИ, 2014. С. 24–32.

4. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. М.: Физматлит, 2007. 368 с.

5. StolarskyT.A. TribologyinMachine Design. Oxford e.a.: Butterworth – Heineman, 1990. 300 p.

6. Williams J. Engineering Tribology. Cambridge e.a.: Cambridge University Press, 2005. 488 p.

7. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: Физматлит, 2013. 352 с.

8. Барчуков Д.А., Цыгвинцев А.В., Афанасьева Л.Е. Особенности формирования структуры и свойств быстрорежущей стали при импульсно-дуговой наплавке // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 4 (4). С. 16–22.

9. Мигранов А.М., Мигранов М.Ш., Колосова Н.В., Ахметова Э.З. Инновационные материалы и покрытия с эффектом адаптации при резании металлов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 4 (12). С. 23–31.

10. Хопин П.Н., Шишкин С.В. Трибология. М.: Юрайт, 2021. 236 с.

11. Рыжов Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. Киев: Наукова думка, 1984. 272 с.

Для цитирования: Измайлов В.В., Новоселова М.В.О влиянии упрочняющей обработки поверхностей трения на ресурс трибосопряжения // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Техническиенауки». 2022. № 3 (15). С. 4–12.

УДК 621.891

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА СМАЗОЧНЫХ СРЕД

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук, Г.Б. БУРДО, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина,22, e-mail: gbtms@yandex.ru

© Болотов А.Н., Бурдо Г.Б., 2022

Рассмотрено воздействие магнитного поля на физико-химические и триботехнические свойства традиционных смазочных материалов и инновационных наноструктурных магнитных масел и жидкостей. Проанализированы причины изменения этих свойств. Показано, какие факторы в первую очередь влияют на поляризуемость масел и поглощение электромагнитного излучения. Для оценки физико-химических свойств были использованы методы диэлкометрии и инфракрасной

спектроскопии. Интегральное воздействие магнитного поля на процесс трения поверхностей, смазанных традиционными немагнитными и магнитными маслами, исследовалось на торцевой машине трения. Сделан вывод о существенном изменении отдельных физико-механических и химических свойств магнитных смазочных материалов при воздействии магнитного поля. Установлен магнитотрибологический эффект, заключающийся во влиянии однородного магнитного поля на смазочные свойства магнитного масла. Описано влияние однородных магнитных полей на противоизносные свойства масла. Сделан вывод о том, что поле снижает агрегативную устойчивость магнитного масла.

Ключевые слова: магнитное наномасло, трение, износ, магнитный коллоид, полимерные оболочки, вязкость, смазка.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость существенного повышения долговечности и энергоэффективности производственного оборудования заставляет использовать в конструкциях инновационные материалы. В частности, в современных узлах трения все шире применяют конструкционные и смазочные магнитные материалы – магнитные жидкости (масла). Магнитные жидкости и другие коллоидные материалы на их основе обладают уникальным сочетанием механических, физических и химических свойств, в связи с чем научный интерес к ним не ослабевает [1]. Большое внимание уделяется проблемам применения магнитных жидкостей для смазывания триботехнических узлов [2, 3]. Отличительной особенностью магнитожидкостных трибоузлов является то, что магнитный смазочный материал поступает в зону трения и удерживается там с помощью стационарных неоднородных магнитных полей. Поэтому для смазки магнитожидкостных трибоузлов не требуется специальных механических устройств, предназначенных для обеспечения регенерации смазочного слоя и восполнения потерь масла. Трибосопряжения не должны быть абсолютно герметичными, а объем магнитной жидкости (масла) может быть относительно небольшим (несколько кубических сантиметров) и др. Однако необходимо учитывать, что в процессе эксплуатации под действием магнитных полей, генерируемых элементами конструкции узла трения из магнитных материалов, физико-химические и триботехнические свойства традиционных смазочных материалов, наноструктурных магнитных масел и жидкостей изменяются. Данный факт необходимо учитывать при проектировании узла и выборе смазочной среды.

Цель данной работы заключалась в изучении воздействия магнитного поля на физико-химические и триботехнические свойства различных по структуре смазочных материалов.

Воздействие магнитных полей на структуру и свойства веществ в жидком состоянии изучалось в работах [4–7], анализировалось изменение их смазывающих и смачивающих свойств и процессов кристаллизации жидкостей после магнитной обработки. Ниже рассмотрены наиболее значимые факторы, приводящие к изменению свойств жидкостей.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Диэлектрические свойства измерялись с помощью прибора Е8-4 на частоте 1кГц в однородных полях относительно большой напряженности – до 1,2МА/м и неоднородных полях с градиентом до 40 МА/м^2. Силовые линии электрического и магнитного полей были коллинеарны (чтобы исключить побочный эффект, вызванный

действием силы Лоренца на движение ионов, небольшое количество которых всегда содержится в масле). Температура масла поддерживалась постоянной, время магнитообработки достигало 12 ч.

Спектры поглощения веществ в инфракрасной области снимались на приборе Specord непосредственно после выдержки масла в поле напряженностью 170 кА/мв течение 100…150 ч. Все измерения проводились с большой тщательностью и многократно повторялись.

Исследовался большой набор органических и синтетических масел: TAD-17, U-20, VKG-96, PES-5, глицерин и др.

Исследования смазочных свойств жидких сред проводились на торцевой машине трения МТП [8] в масляной ванне при скорости скольжения до 1 м/с и нагрузке до 2 МПа.

Для оценки коррозионных свойств масел при циклирующих механических напряжениях использовался оригинальный прибор [9].

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА НЕМАГНИТНЫЕ СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ДИСПЕРСИОННЫЕ СРЕДЫ МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Воздействие магнитных полей на структуру и свойства веществ в жидком состоянии изучалось в работах [4–7], где анализировалось изменение их смазывающих и смачивающих свойств и процессов кристаллизации жидкостей после магнитной обработки. Нам представляется возможным выделить три эффекта, приводящих к изменению свойств жидкостей.

Во-первых, изменение полярности молекул вследствие расщепления энергетических уровней атомов.

Во-вторых, структурирование жидкости и макроперераспределение компонентов [4]. Структурирование объясняется действием на магнитоанизотропные молекулы вращающего магнитного момента *M*:

$$M = \frac{1}{2}\Delta\chi\mu_0 H^2 V \sin 2\alpha,$$

где $\Delta\chi$– разность магнитных восприимчивостей в параллельном и перпендикулярном к оси молекулы направлении; H– напряженность магнитного поля; V– объем, занимаемый молекулой;α– угол между осью молекулы и направлением поля.

Перераспределение компонентов происходит в жидкостях, имеющих молекулы с различной магнитной восприимчивостью и находящихся в неоднородном магнитном поле. В этих условиях наблюдается магнитостатическая сепарация молекул под действием силы:

$$F = \frac{1}{2}\chi\mu_0 V grad M^2,$$

где χ– магнитная восприимчивость молекул.

В-третьих, дополнительная энергия молекул в магнитном поле изменяет характер сольватных комплексов внутри жидкости и на межфазной границе [5, 6].

Перечисленные эффекты должны влиять на поляризуемость масел и поглощение электромагнитного излучения. В связи с этим их значимость оценивалась методами диэлкометрии и инфракрасной спектроскопии.

Результаты диэлкометрических исследований не позволяют говорить о каком-либо существенном изменении поляризуемости молекул масел в магнитном поле (по крайней мере с точностью до 0,1 %). Наблюдалось некоторое изменение тангенса диэлектрических потерь после длительной выдержки в поле. Например, для вазелинового масла с добавками олеиновой кислоты изменение составило 2…4 % и было одним из самых значительных. Этот результат, несомненно, связан с влиянием наведенной магнитным полем анизотропии в расположении молекул в области инфракрасного спектра. Изменения в поглощательной способности масел не проявились.

Предполагаемое магнитосепарационное перераспределение молекул по объему вещества электроспектральными методами не выявлено. С молекулярно-кинетических позиций результат не вызывает сомнения, поскольку для молекул масел показатель степени в распределении Больцмана значительно меньше единицы.

Из вышеизложенного нельзя сделать вывод о каком-либо существенном изменении отдельных физико-механических и химических свойств материалов трения при воздействии магнитного поля.

Экспериментально оценивалось интегральное воздействие магнитного поля на процесс трения поверхностей, смазанных традиционными немагнитными маслами. В зоне трения электромагнитом создавалось однородное магнитное поле для исключения индукционных токов через контакт и скапливания частиц износа. В процессе исследований фиксировался момент трения, износ измерялся профилографическим методом после испытаний.

С точностью до 3 % отклонений среднего значения момента трения при включении магнитного поля не происходило, хотя характер его несколько менялся. Повышение объемной температуры до 360 К не привело к каким-либо изменениям в поле. Это подтверждает справедливость заключения о слабом влиянии гальваномагнитных эффектов[11], роль которых зачастую абсолютизируется. Анализ результатов опытов на изнашивание не показал какой-либо корреляционной связи величины износа с воздействием магнитного поля.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА КОЛЛОИДНУЮ СТРУКТУРУ МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

В отличие от традиционных, магнитные масла содержат сильномагнитные дисперсные частицы, энергия которых в магнитном поле сравнима с тепловой энергией, поэтому в неоднородном магнитном поле возможно перераспределение их содержания по объему вещества [1]. Степень перераспределения частиц достаточно просто оценить по локальному изменению намагниченности насыщения вещества, которая пропорциональна объемному насыщению магнитной фазы.

Полученные данные показывают, что перераспределение содержания магнитной фазы в масле может оказаться существенным и процесс перехода к равновесному распределению протекает наиболее интенсивно в первые часы после включения поля.

Фракционный анализ масла, проведенный методами электронной микроскопии, показал, что перераспределение ферромагнитных частиц происходит по двум параметрам: по их концентрации и размерам. Крупные частицы, а также их агломераты преобладали в тех слоях, где напряженность поля была выше.

Следует отметить, что прогнозировать поведение дисперсных частиц в неоднородном поле на основании распределения Больцмана не всегда правомерно, поскольку в этом случае не учитывается дипольное взаимодействие частиц. Как

следует из опытных данных [10,12–14], отклонение от распределения Больцмана усиливается при увеличении дисперсности частиц, разброса по дисперсионному составу и пока труднопредсказуемо.

В узлах трения приповерхностное повышение концентрации дисперсных частиц может происходить как под влиянием внешних полей, так и полей, возникающих на ферромагнитных поверхностях в месте выхода междоменных границ или месте, где наблюдается скачок нормальной составляющей намагниченности.

Указанное перераспределение частиц в масле, безусловно, негативно влияет на износостойкость узла трения.Особенно это сказывается в начале работы узла, находившегося до этого продолжительное время в состоянии покоя.

Был обнаружен новый магнитотрибологический эффект, который заключается во влиянии однородного магнитного поля на смазочные свойства масла. Оказалось, что в результате воздействия на масло даже относительно слабых однородных полей с напряженностью около $2 \cdot 10^3$ А/м противоизностные свойства масла ухудшаются. С увеличением напряженности поля эффект проявляется сильнее. Причина заключается в том, что поле снижает агрегативную устойчивость магнитного масла. В магнитном поле усиливается диполь-дипольное взаимодействие частиц и происходит их частичная флокуляция. Образующиеся агломераты частиц вызывают абразивный износ поверхностей. Размеры агломератов достигают нескольких микрон и поэтому легко могут быть обнаружены с помощью оптического микроскопа при наблюдении тонкого слоя масла в проходящем свете.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ГРАНИЧНОГО СМАЗОЧНОГО СЛОЯ

Магнитное поле влияет на коллоидную структуру масла, динамику формирования смазочного слоя на поверхностях трения и на их механические свойства. Наиболее важная функция магнитного поля в магнитных подшипниковых опорах заключается в организации движения магнитного масла через зону трения для обеспечения регенерации смазочной пленки. Например, если отключить магнитное поле после начала испытаний магнитного масла на основе полиэтилсилоксана на машине трения МТП, то коэффициент трения постепенно возрастает от 0,15 до более чем 0,3 и трение становится скачкообразным из-за нарушения сплошности смазочной пленки и развивающихся процессов схватывания. Это происходит потому, что, несмотря на наличие большого объема резервного масла, его поступление в зону трения под действием поверхностных сил и сил тяжести происходит недостаточно быстро из-за сравнительно высокой вязкости масла. В магнитном же поле на масло действуют магнитные силы, которые легко преодолевают силы внутреннего трения при невысоких скоростях сдвига в масле и обеспечивают регенерацию смазочной пленки.

Еще одна особенность магнитных масел, находящихся в магнитном поле, касается их реологических свойств. Когда магнитное масло находится длительное время в неподвижном состоянии, в нем под действием магнитного поля начинают развиваться процессы тиксотропного структурообразования. Предельное напряжение сдвига структурированной магнитной жидкости может достигать значительной величины – до 10^4 Па. При проектировании магнитожидкостных узлов трения следует учитывать возрастание момента сил трения при пуске (начале движения) из-за растянутого во времени процесса структурообразования. После разрушения структуры под действием сдвиговых напряжений реологические свойства магнитного масла приблизительно такие же, как у ньютоновских жидкостей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования физико-химических свойств методами диэлкометрии и инфракрасной спектроскопии показали, что при воздействии магнитного поля происходят существенные изменения отдельных физико-механических и химических свойств магнитных смазочных материалов. Для традиционных немагнитных смазочных материалов этот эффект незначителен.

Установлен магнитный трибологический эффект, заключающийся во влиянии однородного магнитного поля на смазочные свойства магнитного масла. Воздействие на масло однородных магнитных полей приводит к ухудшению его противоизносных свойств.

Положительная роль магнитного поля при трении поверхностей, смазанных магнитной жидкостью, заключается в том, что оно ускоряет процесс регенерации смазочной пленки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полунин В.М. Акустические свойства нанодисперсных магнитных жидкостей. М.: Физматлит, 2012. 383 с.

2. Song W.L., Choi S.B., Choi J.Y., Lee C.H. Wear and friction characteristics of magnetorheological fluid under magnetic field activation // *Tribology Transactions*. 2011. V. 54. № 4. P. 616–624.

3. Ермаков С.Ф. Влияние смазочных материалов и присадок на триботехнические характеристики твердых тел. Ч. 2. Активное управление трением // *Трение и износ*. 2012. Т. 33. № 3. С. 275–283.

4. Щурин К.В., Цветкова Е.В. Изменение физико-химических свойств жидких сред методом омагничивания // *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2011. № 10 (129). С. 199–204.

5. Сафронов В.Н. Горленко Н.П., Саркисов Ю.С., Абзаев Ю.А., Кугаевская С.Н., Ермилова Т.А. Роль цикловой магнитной обработки воды затворения в управлении свойствами и процессами гидратации и структурообразования цементных систем //*Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2014. № 4 (45). С. 135–148.

6. КестельманВ.Н. Физические методы модификации полимерных материалов. М.: Химия,2014. 224 с.

7. Горленко Н.П., Сафронов В.Н., Абзаев Ю.А., Саркисов Ю.С., Кугаевская С.А., Ермилова Т.А. Магнитное поле как фактор управления свойствами и структурой цементных систем. Ч. 1. Теоретические предпосылки влияния магнитного поля на физико-химические процессы //*Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2015. № 3 (50). С. 134–150.

8. БолотовА.Н.,Новиков В.В., Новикова О.О. Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных смазочных сред. Ч. 4 // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2016. Вып. 9. С. 102–107.

9. Болотов А.Н.,Новиков В.В., Новикова О.О., Мардян М.В. Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных сред. Ч. 1// *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2013. № 6. С. 68–74.

10. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., Горлов И.В. Исследование структурной стабильности магнитных масел для узлов трения//*Известия Московского государственного технического университета «МАМИ»*. 2014. Т. 4. № 2. С. 15–17.

11. БернштейнМ.П.,Пустовойт В.Н. Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле. М.: Машиностроение, 1987. 256 с.

12. Lukashova N.V., Savchenko A.G., YagodkinYu.D., Muradova A.G., Yurtov E.V. Investigation of structure and magnetic properties of nanocrystalline iron oxide powders for use in magnetic fluids// *Journal of Alloys and Compounds*. 2014. V.586. P. 298–300.

13. Коржов А.В., Рябухин А.Г. Влияние электрического и магнитного полей на коррозию алюминиевых оболочек силовых кабелей // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Химия»*. 2013. Т. 5.№ 1. С.40–46.

14. Бурдо Г.Б., Болотов А.Н. Расчет магнитожидкостных узлов трения, эксплуатируемых в безвоздушной или газовой среде // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки».* 2020. № 2 (6). С. 42–49.

Для цитирования: Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Влияние магнитного поля на эксплуатационные свойства смазочных сред // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Техническиенауки». 2022. № 3 (15). С. 12–18.

УДК 621.891

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВАПОВЕРХНОСТЕЙ, СМАЗАННЫХ МАГНИТНОЙ НАНОСМАЗКОЙ

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук, Г.Б. БУРДО, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина,22, e-mail: gbtms@yandex.ru

© Болотов А.Н., Бурдо Г.Б., 2022

Изучена динамика изменения контактной разности потенциалов между металлическими поверхностями, смазанными магнитным маслом, и его компонентами. Показано, что смазочные свойства исследуемых жидкостей коррелируют с величиной изменения контактной разности потенциалов после их нанесения. С целью прогнозирования эксплуатационных свойств узлов трения, смазанных магнитным маслом, детально изучены специфические физико-химические особенности процессов, протекающих на твердых поверхностях после нанесения магнитного смазочного материала. Оценка энергетических изменений, происходящих на поверхности после нанесения на нее магнитного масла, производилась по работе выхода электронов. С помощью двухкомпонентного магнитного масла изучено влияние дисперсных частиц магнетита на работу выхода электронов. Частицы магнетита прилипают к поверхности под действием вандерваальсового или дипольного взаимодействия и частично экранируют ее. Из полученных данных следует, что добавление в жидкость триэтаноламина магнитных частиц не приводит к существенному изменению работы выхода во всем временном диапазоне. В то же время частицы магнетита, покрытые слоем адсорбированных молекул жирной кислоты, увеличивают работу выхода электронов.

*Ключевые слова:*магнитная жидкость, поверхность, работа выхода электрона, эксплуатационные свойства.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение надежности машиностроительных изделий является важной научной и практической задачей. Применение новых смазочных материалов – модифицированных магнитных жидкостей, содержащих нанодисперсные магнитные частицы, позволяет повысить надежность, качество узлов трения машин и механизмов и расширить их функциональные возможности [1–4].

Однакодля прогнозирования эксплуатационных свойств узлов трения, смазанных магнитной жидкостью (маслом), требуется углубленное понимание механизма смазочного действия. Необходимо детальное изучение специфических физико-химических особенностей процессов, протекающих на твердых поверхностях после нанесения магнитного смазочного материала.

Как установлено (см., например, [5]), сила внешнего трения зависит от энергетического состояния контактирующих поверхностей. Одной из физических характеристик, наиболее чувствительных к этому показателю, является работа выхода электронов. В [6, 7] установлено, что между поверхностной энергией и работой выхода электронов существует приблизительно линейная связь. Хорошая чувствительность работы выхода электронов к структурным изменениям на поверхности трения показана в работах [8–12]. Поэтому в основу оценки энергетических изменений, происходящих на поверхности после нанесения на нее магнитного масла, была положена именно эта характеристика.

Цель работы заключалась в изучении влияния магнитных смазочных материалов на энергию металлической поверхности трения.

МЕТОДИКА И ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

В экспериментах методом вибрирующего конденсатора [6] непосредственно измерялась контактная разность потенциалов U_c, которая связана с работой выхода простым соотношением $eU_c = A_e - A_s$, где A_e – работа выхода электрона из образца, A_s– работа выхода электрона для эталона (в нашем случае для никеля). Площадь вибрирующего электрода равнялась 20 мм^2, следовательно, измеренная контактная разность потенциалов являлась интегральным значением по этой поверхности. Поверхности образцов перед исследованиями предварительно полировались и очищались инертным растворителем.

Динамика изменения контактной разности потенциалов после воздействия на поверхность измерялась в течение нескольких минут (большее время не характерно для условий трения скольжения).

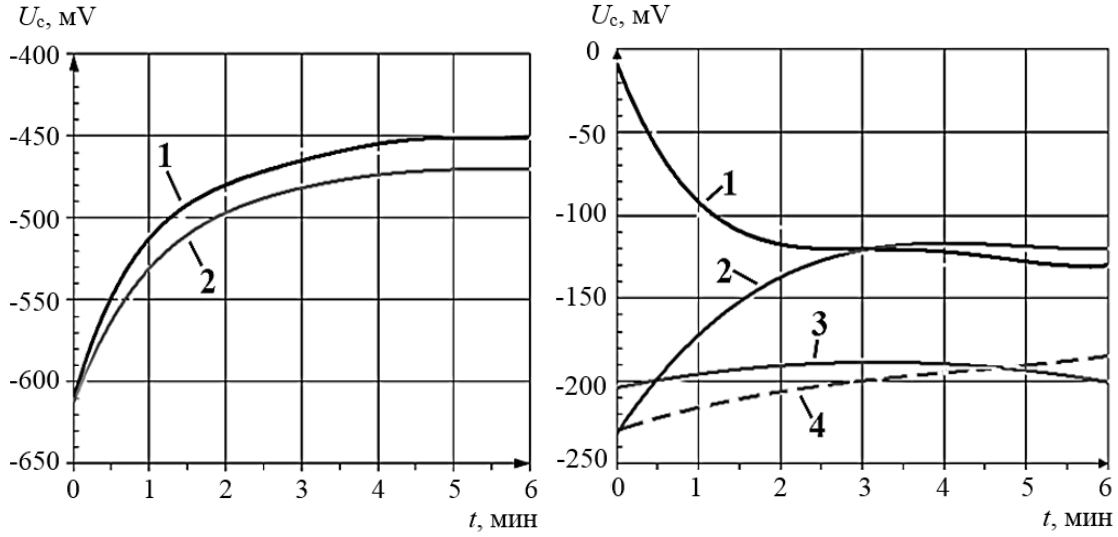
Было изучено взаимодействие двух различных по составу магнитных масел, ММ-1 и ММ-2, с поверхностью, выполненной из стали 45. Масло ММ-1 состояло только из триэтаноламина (ТЕА) и частиц магнетита (5 об. %), масло ММ-2 содержало кремнийорганическую жидкость на основе полиэтилсилоксана (PES-5) и магнетит Fe_3O_4 (5 об. %), стабилизированный для коллоидной устойчивости олеиновой кислотой (ОА). Для сравнения анализировалось взаимодействие с твердой поверхностью жидкостей, являющихся дисперсионной средой магнитных масел (ТЕА и PES-5). Смазочные свойства всех использовавшихся для проведения опытов веществ приведены в таблице (испытывалась пара трения «конструкционная сталь (0,2% С) – оловянно-свинцово-цинковая бронза» при давлении 6,5 МПа, скорости скольжения 0,24 м/с на трехпальчиковой машине трения).

Смазочные свойства магнитных масел и их дисперсионных сред

№ п/п	Смазочный материал	Интенсивность износа, 10^{-9}	Коэффициент трения
1	Жидкость PES-5	16,0	0,15
2	Жидкость PES-5+1% ОА	20,0	0,13
3	Жидкость PES-5+5%ОА	25,0	0,13
4	Жидкость ТЕА	13,2	0,13
5	Масло ММ-1	6,8	0,1
6	Масло ММ-2	6,2	0,1

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Триэтаноламин, входящий в состав масла ММ-1, является ингибитором коррозии с положительным суммарным электронным эффектом. В результате этого сродство электрона к молекулам триэтаноламина оказывается большим, чем к поверхностям исследуемых материалов. В этом случае электроны из поверхности переходят на электронные оболочки молекул,и электронная плотность на поверхности возрастает, образуя электроотрицательный слой и увеличивая работу выхода электрона (рисунока). Формируется прочная хемосорбционная связь молекул триэтаноламина с поверхностью металла, а величина контактной разности потенциалов сдвигается в отрицательную область значений.



(а) (б)

Зависимость контактной разности потенциалов U_c
от времениt после нанесения масел: 1 –ТЕА; 2 – ММ-1 (а);
1 –ММ-2; 2 – PES-5+5% ОА; 3 – PES-5; 4 – чистая дисперсионная среда (б)

С помощью двухкомпонентного магнитного масла ММ-1 представляется возможным выяснить влияние дисперсных частиц магнетита на работу выхода. Частицы магнетита прилипают к поверхности под действием вандерваальсового или дипольного взаимодействия и частично экранируют ее. Из данных, приведенных на рисунке, следует, что добавление в жидкость триэтаноламина магнитных частиц

не приводит к существенному изменению работы выхода во всем временном диапазоне. Небольшое различие объясняется тем, что работа выхода у магнетита больше, чем у стали, поэтому и интегральная работа выхода у поверхности, покрытой маслом с добавлением дисперсных частиц, также будет несколько больше, чем в случае их отсутствия.

Влияние дисперсных частиц магнетита на работу выхода электрона зависит не только от их физических свойств, но и от характера их взаимодействия с молекулами, образующими сольватные (защитные) оболочки. Наиболее часто для сольватации частиц в магнитном масле используют олеиновую или стеариновую кислоту. Сравнение работы выхода электрона из поверхности, покрытой чистыми указанными органическими кислотами и содержащими 10% магнетита, показало, что магнетит увеличивает работу выхода. Добавление магнетита в инактивное вазелиновое масло и жидкость PES-5 также приводит к росту работы выхода электронов. Значит, магнетит, содержащийся в исследованном масле ММ-2, должен аналогичным образом изменять работу выхода электронов.

Сравнение временных зависимостей работы выхода электрона из поверхностей, смазанных магнитными маслом ММ-2 и дисперсионными средами, показывает, что зависимости имеют различный характер изменения и тенденцию к сближению (см. рисунок б). Если работа выхода у поверхностей, смазанных магнитным маслами, со временем увеличивается, то при смазывании их чистыми дисперсионными средами она уменьшается. Этот интересный факт не может быть традиционно объяснен тем, что магнитные масла имеют более сложный состав. В самом деле, добавление в полиэтилсилоксановую жидкость PES-5 ОА, содержащейся в магнитных маслах, не меняет ход временной зависимости работы выхода. Если бы влияние оказывала дисперсная фаза магнитных масел, то это проявилось бы у масла ММ-1.

Указанное различие может быть результатом образования двойного электрического слоя на твердой поверхности непосредственно после нанесения на нее магнитного масла. Вполне возможен адсорбционный механизм образования двойного электрического слоя из ионов, попавших в масло вместе с магнетитом. Магнетит для масел получали методом химической конденсации по реакции, предложенной Элмором. В результате синтеза магнетита как побочные продукты образуются ионы $Cl-$и $NH+$,которые в определенном количестве всегда переносятся в магнитное масло. Содержание в масле элементов, образующих ионы и ионные комплексы, было экспериментально подтверждено с помощью масспектрографических исследований. При контакте масла с поверхностью ионы $Cl-$, как более химически активные, адсорбируются на поверхности и создают на ней заряд, который компенсируется зарядами ионов $NH+$, скапливающимися около поверхности.

Малое значение работы выхода электронов сразу после нанесения масла на поверхность можно объяснить влиянием двойного электрического слоя. Одновременно с образованием двойного электрического слоя на твердую поверхность адсорбируются молекулы олеиновой кислоты (поверхностно-активное вещество), но поскольку подвижность ионов выше, чем молекул, то ионный двойной электрический слой образуется быстрее, чем молекулярный адсорбционный слой. В дальнейшем молекулы поверхностно-активного вещества постепенно разрушают двойной электрический слой и работа выхода увеличивается.

На поверхностях в зоне граничного трения протекают два конкурирующих процесса – разрушения и восстановления адсорбционного смазочного слоя. Поэтому очевидно, что наиболее полно энергетическое состояние поверхности трения характеризует начальное значение работы выхода электрона, причем в сравнении с

работой выхода из чистой поверхности. Согласно экспериментальным данным (см. рисунокб), магнитное масло ММ-2 значительно сильнее влияет на работу выхода, чем триэтаноламин, на основе которого данное магнитное масло получено. Возможно, именно эта особенность является причиной более высоких смазочных свойств магнитных масел (см.таблицу). Аналогичную связь изменения работы выхода электрона с силой трения отмечали и другие исследователи [7]. Можно достаточно обоснованно предположить, что значительное изменение работы выхода электрона из твердой поверхности после нанесения смазочного материала происходит в результате пропорционального снижения энергии металлической поверхности или (и) образования на ней более прочных адсорбционных пленок. Все это приводит к тому, что при умеренных контактных давлениях снижение силы трения при смазывании магнитным маслом (см. таблицу) происходит в результате уменьшения ее адгезионной составляющей.

Следует отметить, что, как правило, контактная разность потенциалов между поверхностями, смазанными магнитными маслами, выше, чем между поверхностями, смазанными дисперсионной средой магнитных масел. Если при смазке магнитным маслом пары трения возникает большее значение U_c, значит, создается большее электрическое поле между контактирующими поверхностями. Стальная поверхность при этом заряжается отрицательно, так как работа выхода электронов у нее выше, чем у сопряженной поверхности из цветного сплава.

Контактное электрическое поле, в свою очередь, может влиять на движение ионов, находящихся в масле. Так, например, под действием поля ионы водорода (протоны), образовавшиеся в результате электрохимических или других реакций, будут увлекаться вглубь стальной поверхности. Вероятно, такое действие контактного электрического поля является одним из факторов, способствующих водородному разрушению стальной поверхности. Очевидно, что контактное электрическое поле влияет на ориентацию дифильных молекул граничного слоя, способствует их проникновению в микротрещины на поверхности и тем самым усиливает эффект Ребиндера.

Отметим еще одну особенность фрикционного контакта поверхностей, смазанных магнитным маслом. При контакте двух металлов в условиях трения с различной работой выхода электрона (энергией Ферми) в результате перераспределения электронов проводимости между поверхностями создается двойной электрический слой, такой же, как при нахождении металла в электролите, который должен обладать выпрямляющим действием. Если поверхности металлов чистые, то величина двойного электрического слоя невелика (около ангстрема) и он становится прозрачным для электронов благодаря туннельному эффекту. В процессе граничного трения поверхностей между ними образуется прослойка из адсорбированных молекул. Толщина двойного электрического слоя значительно возрастает (до десятков нанометров), выпрямляющие свойства контакта становятся ощутимыми и усиливаются при увеличении контактной разности потенциалов.

При контакте поверхностей, смазанных магнитным маслом, возникает большая разность потенциалов, чем при контакте поверхностей, смазанных жидкостями дисперсионной фазы. Магнитные масла образуют также более толстые граничные слои на поверхностях трения из-за наличия в маслах дисперсных частиц. Следовательно, электропроводимость фрикционного контакта, смазанного магнитным и немагнитным маслом, должна ощутимо различаться.

При трении возникают токи проводимости, которые протекают через зону контакта поверхностей трения и влияют на физико-химические процессы в области контакта. Величина токов (например, индуцируемых внешними магнитными

полями,предназначенными для позиционирования магнитного масла) зависит от направления движения носителей заряда и электропроводимости контакта. На основании приведенных данных следует ожидать, что негативное влияние токов на свойства фрикционного контакта, смазанного магнитным маслом, будет меньше. Этим, в частности, можно объяснить противоречивость результатов по влиянию магнитных полей на трение.

Несколько серий экспериментов было выполнено с целью установления влияния магнитного поля на поверхностные свойства твердых тел. Такое влияние может быть результатом как непосредственного взаимодействия спинов электронов с магнитным полем, так и изменения обменного взаимодействия между электронами в поле.

Энергетическое состояние поверхностных электронов изменяется в реальном внешнем магнитном поле (10^5 А/м) на величину порядка 10^{-5} эВ и не может существенно повлиять на физические свойства поверхности и исключить эмиссию электронов.

Зависимость обменных взаимодействий в ферромагнитных телах от ориентации спинов электронов является причиной магнитострикции, проявляющейся в изменении их размеров при намагничивании. При магнитострикции изменение расстояний между атомами кристаллической решетки приводит к изменению энергетического состояния атомов. Поэтому если магнитострикция охватываеттакже поверхностный слой ферромагнетика, это должно повлиять на работу выхода.

Возможно влияние внешнего магнитного поля на (через) тонкую структуру поверхностного магнетизма, что может привести к изменению характера хемосорбционных процессов.

В первой серии экспериментов определялась работа выхода из поверхности образцов, выполненных из ферромагнитных материалов – стали 20, 45, У10А. Перед опытами поверхность образцов тщательно очищалась органическими растворителями, затем образец помешался в прибор для измерения работы выхода. После того как стабилизировалась структура поверхности и работа выхода устанавливалась постоянной, на образец, не изменяя его положения, воздействовали магнитным полем, величина которого около исследуемой поверхности составляла приблизительно 10^5 А/м. Однако никаких изменений работы выхода в магнитном поле обнаружено не было.

Во второй серии экспериментов определялась работа выхода электрона из поверхности размагниченных и намагниченных постоянных магнитов из сплава $SmCo_5$. Вначале определялась работа выхода на определенном участке поверхности размагниченного образца, затем образец намагничивался без каких-либо механических воздействий и на том же участке снова определялась работа выхода. Установлено статистически достоверное увеличение работы выхода после намагничивания на (7–15) 10^{-2} эВ. В связи с этим отсутствие эффекта влияния магнитного поля на работу выхода из сталей можно объяснить тем, что энергия магнитострикционных напряжений у них на2–4 десятичных порядка меньше, чем у постоянных магнитов.

В следующей серии экспериментов проверялось влияние магнитного поля на динамику формирования межфазной поверхности на границе «магнитное масло – твердое тело». Приложение магнитного поля к стальным образцам, покрытым кремнийорганическим магнитным маслом, не приводило к изменению хода временной зависимости работы выхода.

На основании большого количества эмпирических данных можно сделать качественный вывод о том, что работа выхода из поверхности намагниченного магнита, которая покрыта магнитным маслом, быстрее стабилизируется, чем для поверхности размагниченного образца. Количественная оценка указанного различия не представляется возможной из-за низкой воспроизводимости результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана динамика изменения контактной разности потенциалов, возникающая после нанесения на стальную поверхность типовых магнитных масел и их компонентов, а также предложена физико-химическая трактовка полученных результатов. В рамках выполненных исследований прослеживается корреляция между начальной контактной разностью потенциалов смазанных поверхностей и их триботехническими свойствами. Дальнейшие исследования позволят уточнить полученные результаты и высказанные предположения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болотов А.Н., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов в триботехнических системах:монография. Тверь: ТвГТУ, 2019. 164 с.

2. Korolev V.V., Ramazanova A.G., Yashkova V.I., Balmasova O.V. Physicochemical properties of magnetic fluids based on synthetic oils //*Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2013. V. 87. № 4. P. 684–687.

3. Болотов А.Н.,Новиков В.В., Новикова О.О. О зависимости коллоидной устойчивости магнитных жидкостей от диэлектрической проницаемости стабилизатора и дисперсионной среды // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химияихимическаятехнология*. 2017. Т. 60. № 4. С. 75–81.

4. Ochoński W. Sliding bearings lubricated with magnetic fluids //*Industrial Lubrication and Tribology*. 2007. V. 59.№ 6.P. 252–265.

5. Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Малышев Е.Н., Зенкин Н.В. Энергия поверхностного слоя металлов как инструмент воздействия на величину коэффициента трения //*Фундаментальные исследования*. 2015. № 2. С. 251–254.

6. Демченко В.В.,Хомутов Н.Е. О взаимной связи работы выхода электрона с поверхностным натяжением // *Труды Московского химико-технологического института им. Д.И. Менделеева*. 1962. Вып. 39. С. 115.

7. Zharin A., Pantsialeyeu K., Opielak M., Rogalski P. Charge sensitive techniques in tribology studies //*Przegląd Elektrotechniczny*. 2016. V. 92. № 11. P. 239–243.

8. Hua G., Li D. Electron work function: a novel probe for toughness //*Physical Chemistry Chemical Physics*. 2016. V. 18. № 6. P. 4753–4759.

9. Lu H., Hua G., Li D. Dependence of the mechanical behavior of alloys on their electron work function – An alternative parameter for materials design //*Applied Physics Letters*. 2013. V. 103. № 26. URL: https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4852675(дата обращения: 17.12.2021).

10. Буше Н.А., Копытько В.В. Совместимость трущихся поверхностей. М.: Наука, 1981. 127 с.

11. Hua G., Li D. Generic relation between the electron work function and Young's modulus of metals //*Applied physics letters*. 2011. V. 99. № 4.URL: https://aip. scitation.org/doi/abs/10.1063/1.3614475 (датаобращения: 17.12.2021).

12. Бурдо Г.Б., Болотов А.Н. Смазочные наномасла на основе кремнийорганических наножидкостей //*Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 4 (8). С. 13–21.

Для цитирования: Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Энергетические свойства поверхностей, смазанных магнитной наносмазкой // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Техническиенауки». 2022. № 3 (15). С. 18–24.

УДК 621.914

МНОГОСЛОЙНЫЕ НАНОСТРУКТУРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

М.Ш. МИГРАНОВ, д-р техн. наук,Е.В. ИСАЕВ, гл. науч. сотр.,
А.М. МИГРАНОВ, науч. сотр.,И.И. МОСЕНЗ, гл. науч. сотр.,
А.С. ГУСЕВ, асп., С.С. ОПЛЕСНИН,науч. сотр.

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», 127994, ГСП-4, Москва, Вадковский пер.,1, e-mail: migmars@mail.ru

© Мигранов М.Ш., Исаев Е.В., Мигранов А.М., Мосенз И.И., Гусев А.С., Оплеснин С.С., 2022

Представлены результаты экспериментальных исследований износостойкости концевых фрез с многослойными композиционными покрытиями при лезвийной обработке резанием хромоникелевых сплавов, которые широко применяются в ответственных, тяжелонагруженных и высокотемпературных трибосопряжениях авиакосмической техники. Исследованы перспективные и инновационные износостойкие покрытия, полученные на различных установках и при использовании различных технологий.

Ключевые слова: концевые фрезы, многослойные композиционные покрытия, хромоникелевые сплавы, тяжелонагруженные и высокотемпературные трибосопряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Машиностроение является ключевой отраслью промышленности, так как без использования его возможностей по изготовлению необходимых деталей, изделий, оборудования не может обойтись ни одна отрасль. Ориентация отечественной промышленности на малооперационные, малоотходные и безотходные технологические процессы, на замену в отдельных случаях резания материалов более экономичными методами формообразования не исключает, однако, лезвийную обработку резанием, которая остается основным технологическим приемом изготовления деталей машин. Это связано, во-первых, с появлением новых материалов, трудноподдающихся обработке; во-вторых, с усложнением конструкционных форм деталей; в-третьих, с повышением требований к точности и качеству изготовления деталей и,в-четвертых, с возможностью гибкого управления обработкой резания в отличие от других методов [1,2].

В настоящее время в машиностроении широко применяются металлорежущие станки с числовым программным управлением и автоматизированные технологические комплексы, работающие по принципу «безлюдной» технологии. Для изготовления режущих инструментов используются новые сверхтвердые композиционные материалы, синтетические и природные алмазы. Тенденции в развитии машиностроения связаны с автоматизацией производственных процессов, созданием гибких производственных систем и автоматизированных заводов и требуют поиска новых подходов к исследованию процесса резания, основанных на достижениях фундаментальных наук, а также разработки новых видов обработки резанием, режущих инструментов и станков. Все этопредполагает использование достижений науки в

области резания материалови невозможно без разработки инновационных многокомпонентных износостойких покрытий и методов их получения, исследования функциональных свойств покрытий при обработке титановых, жаропрочных и жаростойких сталей и сплавов. При этом для промышленного производства актуально изучение и исследование влияния того или иного покрытия режущего инструмента на показатели качества поверхностного слоя, полученного после лезвийной обработки резанием [1–5].

Целью работы является исследование износостойкости усовершенствованных многофункциональных покрытий на режущем инструменте при фрезеровании жаропрочных хромоникелевых сплавов.

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для обеспечения достоверности полученных результатов экспериментальные исследования при фрезеровании выполнялись на аттестованном оборудовании. Испытания проводились на вертикально-фрезерном станке нормальной точности и жесткости модели ВМ127М отечественного производства. Устанавливались закономерности износа режущих инструментов при торцевом встречном фрезеровании твердосплавными концевыми фрезами (диаметр d =12 мм; количество зубьев z = 4) марки Н10F (аналог ВК10 ОМ) с различными покрытиями. В качестве обрабатываемого материала использовались хромоникелевые сплавы марок ХН50МВКТЮР,ХН58МБЮД-ИД.

Исследование обрабатываемости хромоникелевых сплавов при натурных испытаниях осуществлялось согласно рекомендациям и режимам, используемым на промышленных предприятиях: частотавращения n = 800 об/мин; подача$S_м$= = 65 мм/мин; ширина фрезерования a_e = 4 мм и глубинаa_p = 1 мм.

В процессе фрезерования для обеспечения идентичности результатов и исключения погрешностей измерения ширину фаски износа инструмента по задней поверхности измеряли с помощью отсчетного микроскопа МИР-2М с насадкой МОВ-I5 точностью отсчета до 0,002 мм на рабочем месте. По достижении $h_з$значений 0,35…0,4 мм для дополнительного контроля и фотофиксации картины износа использовался универсальный моторизированный стереомикроскоп с возможностью телекоммуникации Carl Zeiss Stereo Discovery V12 с системой визуализации на базе видеокамеры модели Zeiss Axiocam 503 Color. При этом износ фрезы измерялся при определенных количествах прохода и, соответственно, длины пути резания с целью получения картины всех стадий кривой изнашивания (участков приработочного, нормального и катастрофического изнашивания).

Износостойкие покрытия наносились на трехразличных установках:

Platit π311 и ННВ-6.6-И1 на базе лаборатории «Технологии нанесения покрытий и термической обработки» МГТУ «СТАНКИН» – (CrAlSi)N; (CrAlSi)N с DLC (Diamond-Like Carbon – алмазоподобное углеродное покрытие); (TiAlSi)N; (CrAlSi)N + эпилама; (CrAlSi)N с DLC + эпилама; (TiAlSi)N + эпилама; модернизированной ННВ-6.6-И1;

на модернизированной ННВ-6.6-И1 в лаборатории «Инновационных материалов и покрытий» ИКТИ РАН – (TiCrAl)N; (ZrCrAl)N; (ZrMoAl)N; (ZrMoHfCrAl)N;

Platit π411 на базе Технопарка «Авиационные технологии» – TiB2; nACo3; nACRo; nACo3 + TiB2; nACRo + TiB2; TiB2 + эпилама; nACo3 + эпилама; nACRo + эпилама; nACo3 + TiB2 + эпилама; nACRo + TiB2 + эпилама.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Большинство экспериментальных данных по износу и стойкости режущих инструментов получены путем непосредственного наблюдения и измерения зон износа на фрезе. При этом, как показали предварительные эксперименты и анализ литературных данных [1,2,4–9], в условиях получистового резания определяющим элементом износа инструмента является фаска износа по его задней поверхности. Анализ профиля износа задней поверхности, выполненный в исследовании [1], показал, что наименьшей изменчивостью результатов характеризуется средний износ задней поверхности вдоль главной режущей кромки. Этот параметр при постоянных значениях переднего и заднего углов режущего клина отражает размерную износостойкость инструмента. Исходя из вышеизложенного, в качестве исследуемого параметра износа инструмента использовали среднюю ширину фаски износа задней поверхности (без учета выемок).

Результаты экспериментальных исследований износостойкости режущего инструмента с различными покрытиями при фрезеровании хромоникелевых сплавов представлены в виде графиков зависимости износа инструмента по задней поверхности ($h_з$, мм) от суммарной длины рабочего хода фрезы (l,м) (рис.1, 2), а также в виде диаграмм зависимости периода стойкости от покрытия, наносимого на режущий инструмент (рис.3, 4).При фрезеровании хромоникелевых сплавов наилучшие показатели по износостойкости режущего инструмента (износ по задней поверхности, суммарная длина рабочего хода фрезы и период стойкости инструмента) обеспечивались:

для сплава ХН50МВКТЮР при использовании износостойких покрытий: улучшение на 24 % с покрытием nACo3 + TiB2 и на 23 % с покрытием nACRo + TiB2 по сравнению с покрытием nACo3;

для сплава ХН58МБЮД-ИД при использовании износостойкого покрытия: улучшение на 23 % с покрытием nACRo + TiB2 по сравнению с покрытием nACo3.

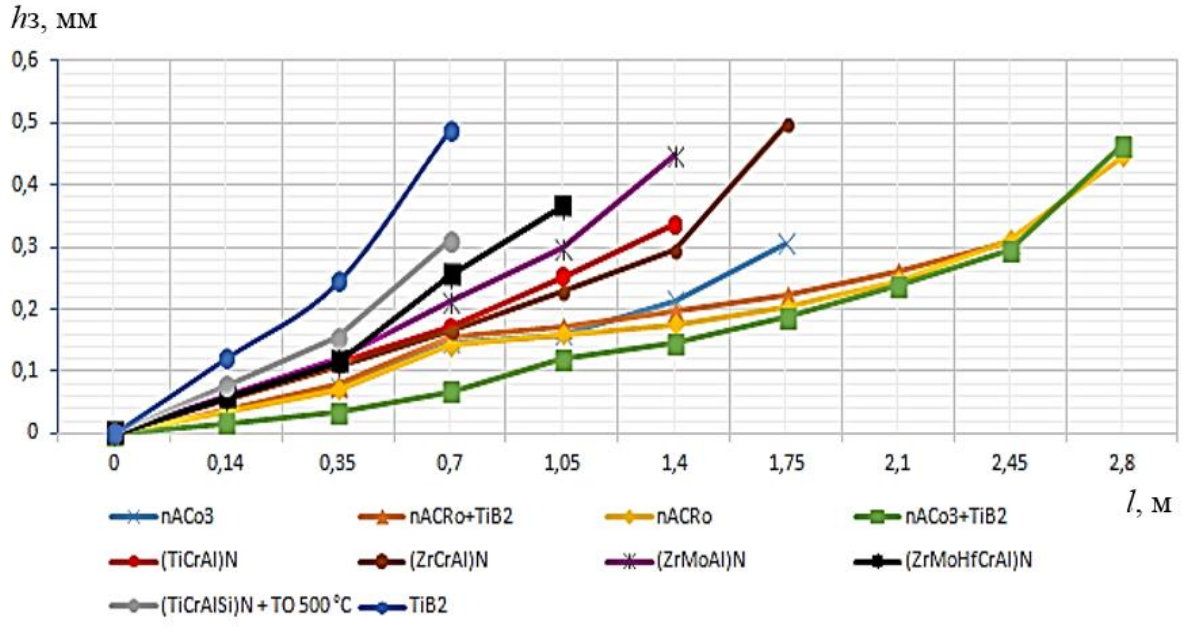


Рис.1. Величина износа по задней поверхности при фрезеровании хромоникелевого сплава ХН50МВКТЮР твердосплавными фрезами марки H10F (ВК10 ОМ) с различными покрытиями

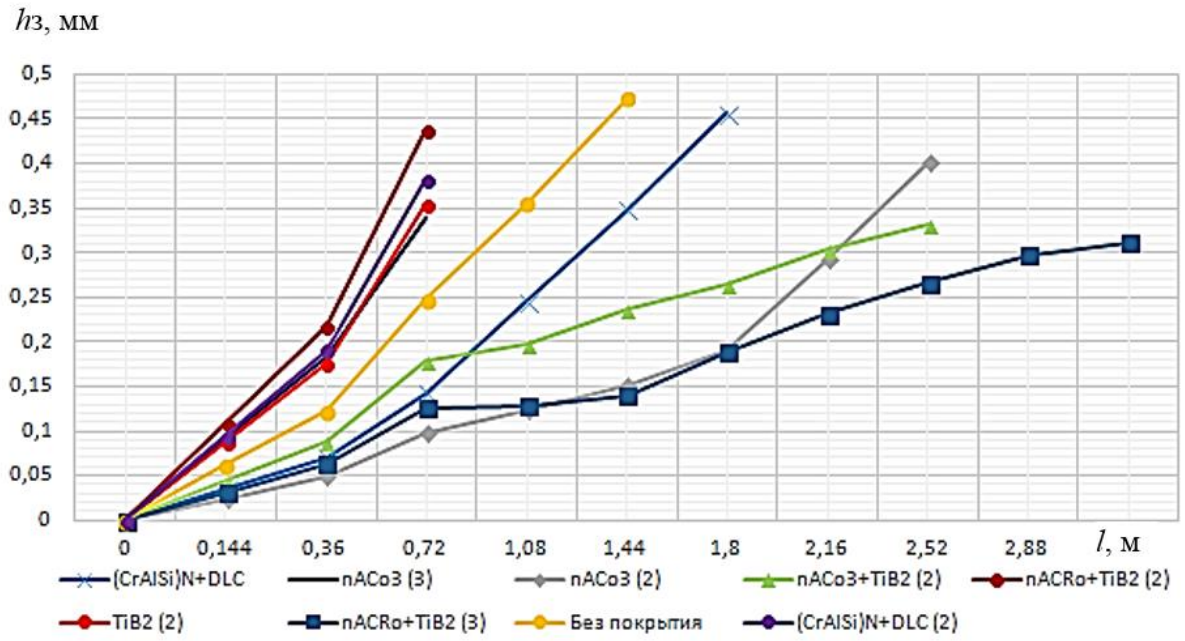


Рис.2. Величина износа по задней поверхности при фрезеровании хромоникелевого сплава ХН58МБЮД-ИД твердосплавными фрезами марки Н10F (ВК10 ОМ) сразличными покрытиями

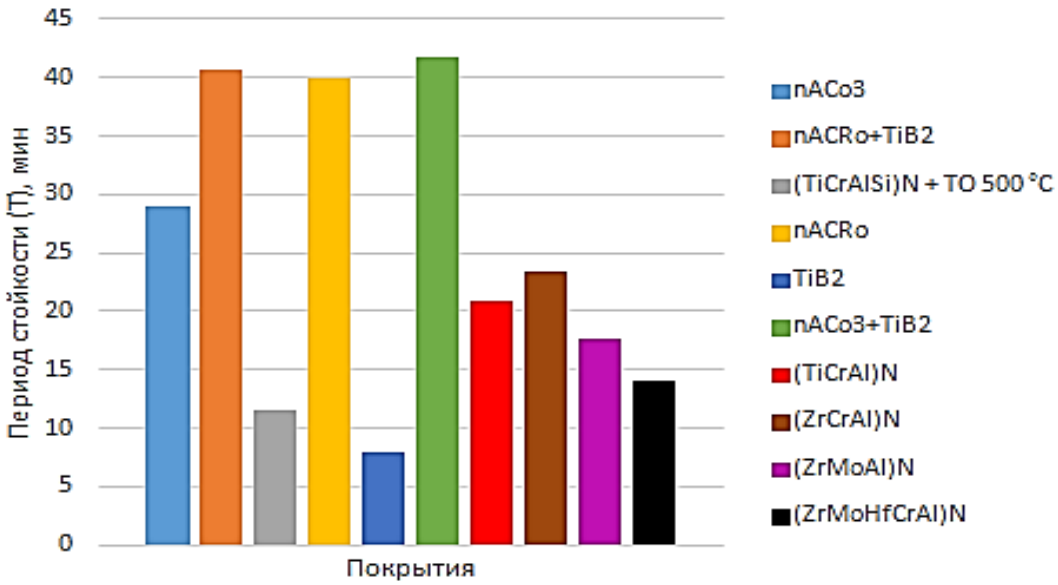


Рис. 3. Период стойкости при фрезеровании хромоникелевого сплава ХН50МВКТЮР твердосплавными фрезами марки Н10F (ВК10 ОМ) сразличными покрытиями

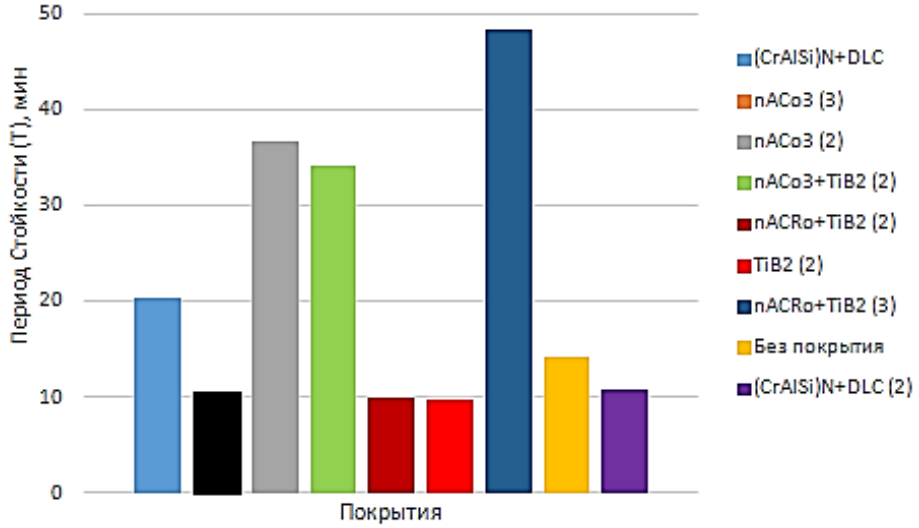


Рис. 4. Период стойкости при фрезеровании
хромоникелевого сплава ХН58МБЮД-ИД твердосплавными фрезами
марки H10F (ВК10 ОМ) с различными покрытиями

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании серии экспериментальных исследований износостойкости режущего инструмента с различными покрытиями при фрезеровании хромоникелевых сплавов установлено, что наилучшие показатели по износостойкости режущего инструмента (по таким параметрам, как износ по задней поверхности, суммарнаядлина рабочего хода фрезы и период стойкости инструмента) обеспечиваютсяпри использовании износостойких покрытий nACo3+TiB2 и nACRo+TiB2 при обработке сплава ХН50МВКТЮР. При фрезеровании сплава ХН58МБЮД-ИД лучшую износостойкость показал инструмент с покрытием nACRo++ TiB2. Эффективность износостойких покрытий с диборидом титана при лезвийной обработке резанием, видимо, обусловлена образованием на контактных поверхностях защитных пленок, обладающих смазывающими и экранирующими свойствами.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
(проект № 22-19-00670, https://rscf.ru/project/22-19-00670/)

ЛИТЕРАТУРА

1. Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов. М.: Высшая школа, 2009. 336 с.

2. Табаков В.П., Сагитов Д.И. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями в условиях стесненного резания. Ульяновск: УлГТУ, 2015. 179 с.

3. Верещака А.А., Григорьев С.Н. Теоретическое обоснование выбора рациональной архитектуры и элементов состава многослойно-композиционных износостойких покрытий. М.: МГТУ «СТАНКИН», 2020. 141 с.

4. Криони Н.К., Мигранов М.Ш., Шехтман С.Р. Наноструктурированные вакуумные ионно-плазменные покрытия. М.: Инновационное машиностроение, 2017. 367 с.

5. Григорьев С.Н., Верещака А.А., Волосова М.А. Современные многослойно-композиционные наноструктурированные покрытия для твердосплавного и керамического режущего инструмента. М.: МГТУ «СТАНКИН», 2020. 164 с.

6. Vereschaka A., Grigoriev S., Milovich F., Sitnikov N., Migranov M., Andreev N., Bublikov Yu., Sotova C. Investigation of tribological and functional properties of Cr,Mo-(Cr, Mo)N-(Cr,Mo,Al)N multilayer composite coating // *Tribology International*. 2021. V. 155. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X20306290 (дата обращения: 17.12.2021).

7. Migranov M.S., Migranov A.M., Minigaleev S.M., Shehtman S.R. Tribological Properties of Multilayer Coatings for Cutting Tool // *Journal of Friction and Wear*.2018. V. 39. № 3. P. 245–250.

8. Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Гусев А.С., Садыков А.Ф.Изнашивание режущего инструмента с многослойными композиционными покрытиями//*Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Техническиенауки».*2020. № 2 (6). С. 36–41.

9. Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Шехтман С.Р. Температура резания при применении инструмента с многослойным покрытием. //*Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Техническиенауки».*2021. № 3 (11). С. 34–43.

Для цитирования: Мигранов М.Ш., Исаев Е.В., Мигранов А.М., Мосенз И.И., Гусев А.С., Оплеснин С.С. Многослойные наноструктурные композиционные покрытия для фрезерования хромоникелевых сплавов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Техническиенауки». 2022. № 3 (15). С. 25–30.

УДК 621.914

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ИЗНАШИВАНИЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ И КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ С ЭФФЕКТОМ АДАПТАЦИИ

М.Ш. МИГРАНОВ, д-р техн. наук,А.М. МИГРАНОВ, науч. сотр.

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», 127994, ГСП-4, Москва, Вадковский пер.,1, e-mail: migmars@mail.ru

© Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., 2022

На основе термодинамики неравновесных процессов разработана методология исследования изнашивания режущих инструментов и износостойких покрытий с эффектом прогнозируемой адаптации поверхностей трения. Использование методологии даст возможностьоценить самоорганизацию трибосистемы при резании металлов, обеспечит научнообоснованный подход к выбору и применению инструментов и условий резания с прогнозируемыми свойствами самоорганизации при трении. Предложенные принципы выбора и применения инструментальных материалов и износостойких покрытий позволят существенно повысить эффективность лезвийной обработки резанием.

Ключевые слова: пластическая деформация, температура резания, термодинамика неравновесных процессов, трибосистема, самоорганизация, прогнозируемая адаптация, уровень и интервал самоорганизации.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе резания вследствие изнашивания инструмента происходит непрерывное изменение пространственной формы контактных поверхностей. Это может привести к изменению распределения напряжений и температур в зоне фактического контакта и в целом оказать существенное влияние на интенсивность изнашивания режущего инструмента (даже при обработке без применения смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) и износостойких покрытий с постоянными значениями элементов режима резания). Таким образом, трение контакта и распределение удельных нагрузок и температур являются взаимообусловленными процессами, что необходимо учитывать при разработке методологии исследования изнашивания режущих инструментов и выводе аналитических зависимостей для расчета интенсивности износа при использовании тех или иных методов интенсификации процесса лезвийной обработки резанием.

Механизм износа режущего инструмента весьма сложен. По существующим представленияминструмент,в зависимости от условий резания,может подвергаться адгезионному, абразивному, диффузионному, химическому, окислительному и другим видам износа [1–5]. Для расчета диффузионного износа со стороны задней поверхности инструмента может применяться теоретическая формула стойкости, предложенная Т.Н. Лоладзе [3]. И.В. Крагельским получены формулы для расчета интенсивности изнашивания для явлений трения и износа трущихся поверхностей [6]. Ю.Г. Кабалдинрассматривает процесс изнашивания инструмента с позиций структурно-энергетического подхода к прочности твердого тела [5]. Следует, однако, отметить, что определение точных аналитических зависимостей интенсивности изнашивания режущего инструмента, периода стойкости и других показателей обрабатываемости с учетом действий всех видов износа представляет собой сложную задачу. Основу для расчета выходных параметров процесса резания по-прежнему представляет эксперимент, и существуют различные степенные зависимости, которые соответствуют изменению стойкости в зависимости от условий опыта. В большинстве эмпирических формул для расчета интенсивности изнашивания инструмента используются в основном внутренние (температура резания, степень пластической деформации, касательные напряжения, удельные нагрузки и т.д.) и внешние (скорость, подача, глубина резания и т.д.) параметры процесса резания, а также поправочные коэффициенты, учитывающие особенности конкретных условий обработки. В связи с этим различными исследователями предлагаются аналитические зависимости, в определенной степени учитывающие входные параметры процесса резания в рамках конкретных моделей износа инструмента, без учета влияния СОТС, износостойких покрытий и переменности во времени как входных, так и внутренних параметров.

В работах [6–12] установлено, что из всех показателей обрабатываемости резанием на первый план выступает влияние обрабатываемого материала на износ режущего инструмента, характеризуемое уровнями наиболее целесообразных режимов резания и соответствующих им интенсивностей изнашивания.

Несмотря на значительный объем исследований и прогресс в области теории трения и износа, сформулировать общее решение по определению износостойкости режущего инструмента оказывалось невозможным из-за сложности явлений,

сопровождающих процесс износа при резании, и наличия большого числа неконтролируемых переменных. Поэтому цель данной работы заключается в разработкетакой методологии исследования изнашивания режущих инструментов со свойствами прогнозируемой адаптации при трении, которая позволит раскрыть сложные механизмы приспосабливаемости поверхностей трения при лезвийной обработке резанием.

ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Резание металлов по своей физической природе представляет собой сложный процесс [1–3]. На контактных поверхностях режущего инструмента с обрабатываемым материалом возникают большие давления (до 2000 МПа и более), имеют место высокие скорости деформации (до 10^6 $с^{-1}$), повышается температура (до 1 200–1 500 К) и т.д. При этом создаются благоприятные условия для развития адгезии, взаимной диффузии, окисления и наводороживания поверхностей, изменения их структурно-фазового состава, генерирования электродвижущей силы (ЭДС). Эти явления оказывают существенное негативное влияние на состояние и свойства контактных поверхностей инструмента и обрабатываемого материала.

Одним из основных источников тепла и факторов формирования приповерхностных слоев при резании служит трение. Поскольку оно происходит при высокой температуре в условиях ювенильности контакта и наличия пластических деформаций, в адгезионных процессах доминирует адгезионная (молекулярная) составляющая [4].

При относительном скольжении контактирующих поверхностей инструмента и обрабатываемой детали происходит непрерывный процесс возникновения и срезания адгезионных пятен. Поверхность инструмента находится под действием срезающих напряжений, в результате чего частицы материала местами отрываются от поверхности. Обычно такой срыв значительно больше со стороны мягкого материала, но исследования с применением электронной микроскопии[4] показывают, что при этом всегда имеет место и перенос частиц с более твердого материала (инструментального) на более мягкий (обрабатываемый). Вместе с тем для уточнения составляющих энергетического баланса необходимо рассмотреть процессы контактного взаимодействия обрабатываемого материала и поверхностей режущего инструмента.

В этом случае согласно [4, 8, 10–12] при относительном перемещении в точках реального контакта будут происходить следующие явления. Приповерхностные слои более мягкого тела увлекаются силами адгезии и деформируются – вначале упруго, а затем (если величина прочности адгезионных связей на срез τ_nпревышает величину пластической постоянной, равнуюK = $\sigma_т$ / 2) получают пластическую деформацию. Деформируясь пластически, эти слои упрочняются (наклепываются), и их предел текучести возрастает до значения $\sigma'_т$, соответствующего тому состоянию материала, которое предшествует его разрушению. В дальнейшем возможны следующие варианты:

1) если $\sigma'_т /2 > \tau_n$, то в определенный момент градиент механических свойств станет положительным и разрыв связи будет происходить по поверхности раздела контактирующих тел;

2) если $\sigma'_т /2 < \tau_n$, то разрушение будет происходить по более слабому месту на значительной глубине с образованием налипов.

Отсюда следует, что в условиях схватывания (сварки), когда при скольжении

деформация и разрушение происходят не на поверхностности контакта, напряжения τ_n должны отражать прочность на сдвиг приповерхностного слоя более мягкого из контактирующих тел; при отсутствии схватывания эти напряжения связаны с диссипацией энергии, расходуемой на разрыв образовавшихся при контактировании связей.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗНАШИВАНИЯ

На основании термодинамической модели изнашивания лезвийных инструментов [9,10] разработана экспериментально-аналитическая методология исследования оценки эффективности использования инструментов и условий резания с программируемыми свойствами самоорганизации при трении. Структурно-логическая схема этой методологии представлена на рис. 1. В ней предусмотрены следующие основные блоки:

1) факторы воздействия на процесс резания;

2) изнашивание инструментов;

3) исследование прогнозируемой адаптации поверхностей трения(ПАПТ) (самоорганизация в приповерхностных слоях при трении);

4) обобщение результатов;

5) информационная база данных.

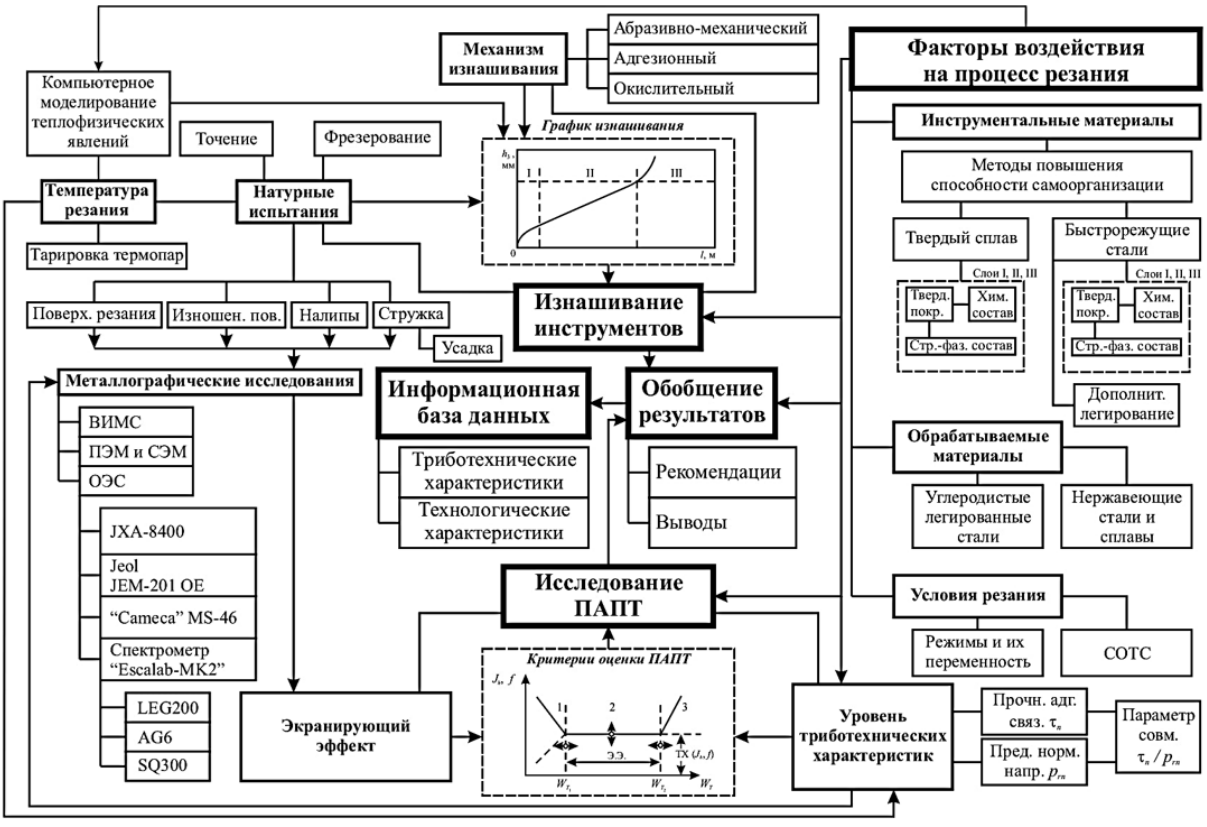


Рис. 1. Структурно-логическая схема методологии исследования изнашивания режущих инструментов с программируемыми свойствами самоорганизации при трении

В качестве факторов воздействия на процесс резания металлов выбраны:

1) инструментальные материалы (быстрорежущие стали и твердые сплавы);

2) обрабатываемые материалы (углеродистые легированные стали, нержавеющие стали и сплавы);

3) условия резания (режимы и их переменность, применение СОТС).

Методами повышения способности самоорганизации выбраны:

1) для быстрорежущих сталей – дополнительное легирование и нанесение износостойких покрытий;

2) для твердых сплавов – нанесение износостойких покрытий.

В блоке «Изнашивание инструментов» предусматривается проведение натурных испытаний и компьютерное моделирование теплофизических явлений при точении и фрезеровании в условиях реализации перечисленных выше факторов воздействия на процесс резания металлов. При этом фиксируются результаты численных расчетов при моделировании, графики изнашивания (по пути или времени резания), термоЭДС естественной термопары, коэффициент укорочения стружки; сохраняются фрагменты стружки, поверхности фрикционного контакта под индентором (лунка), изношенной поверхности режущего инструмента и обработанной поверхности.

По результатам тарирования естественных термопар значения термоЭДС переводятся в показатели температуры резания. По заданным параметрам (в основном по скорости резания) гипотетическиопределяется механизм изнашивания инструмента (абразивно-механический, адгезионный или окислительный).

Принимая во внимание термодинамические концепции, можно разделить весь спектр процессов, протекающих при трении и изнашивании, на две группы:

нормальное изнашивание (области 1, 2 на рис. 2),

катастрофическое изнашивание, уязвимое по повреждениям (область 3 на рис. 2).

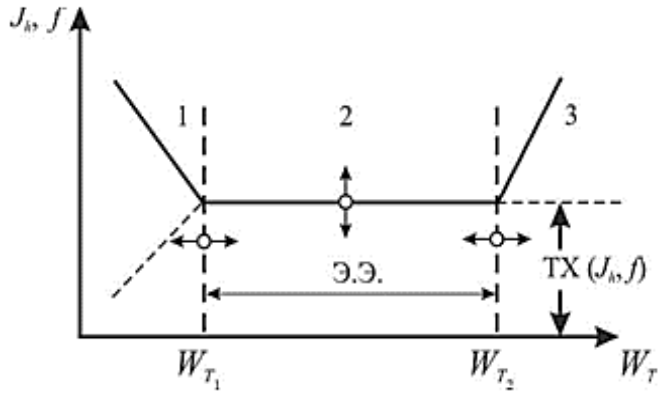


Рис. 2. Изменение показателей ПАПТ фрикционногоконтакта
«инструмент – обрабатываемая деталь» при различных энергиях активации (W_T):
1 – область неустойчивого процесса; 2 – область самоорганизации;
3 – область повреждения; ТХ– триботехнические характеристики;
ЭЭ– экранирующий эффект

В течение всего периода работы в условиях нормального трения и износа макроскопических разрушений на поверхности трибопары не наблюдается. При этом самоорганизация во время износа происходит благодаря способности трибопары спонтанно организовывать устойчивые упорядоченные структуры, которые защищают (экранируют) основной материал трибопары от непосредственного воздействия

контртела. Периодически эти структуры уносятся с частицами износа и создаются вновь.

Результаты процесса ПАПТ можно оценить с помощью таких показателей, как уровень триботехнических характеристик и экранирующий эффект, которые определяют параметры трения и износа. Из этого следует, что контроль за трением и износом осуществляется с целью повышения эффективности ПАПТ (снижения уровня триботехнических характеристик и повышенияэкранирующего эффекта).

В блоке «Исследование ПАПТ» (самоорганизация) при трении предусматривается оценка уровня триботехнических характеристик и экранирующего эффекта при образовании на фрикционном контакте вторичных фаз. При оценке уровня триботехнических характеристик на одношариковом трибометре (с учетом факторов воздействия на процесс резания и температуру контакта) определяются:

прочность адгезионных связей на срез;

предельные нормальные напряжения в условиях пластической деформации;

параметр совместимости (по существу, молекулярная составляющая коэффициента трения).

Экранирующий эффект (интервал) самоорганизации оценивается результатами металлографических исследований изношенных поверхностей режущих инструментов, прирезцовой стороны стружки и поверхности резания, зоны налипов на контактирующих поверхностях инструментов; поверхностей фрикционного контакта в триботехнических исследованиях. Результаты, полученные в блоках «Изнашивание инструментов» и «Исследование ПАПТ», а также информация из блока «Факторы воздействия на процесс резания» (см. рис. 1) поступают в блок «Обобщение результатов», где делаются выводы и разрабатываются рекомендации для научного и практического исследования. Эти выводы и рекомендации поступают в блок «Информационная база данных», в котором хранится информация триботехнического и технологического характера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методология оценки эффективности адаптации трибосистемы при резании металлов позволит обоснованно подойти к выбору и применению инструментов и условий резания с прогнозируемыми свойствами самоорганизации при трении. Предложенные принципы выбора и применения инструментальных материалов и износостойких покрытий на основе результатов исследования вторичных структур на трущихся поверхностях могут использоваться для обеспечения как можно более полного интенсивного и раннего прохождения неравновесных процессов, в том числе самоорганизации на трущихся поверхностях, которая позволит существенно повысить эффективность обработки резанием. При этом для уменьшения интенсивности изнашивания режущих инструментов необходимо, чтобы дополнительные источники производства энтропии (СОТС, переменность элементов режима резания и др.) способствовали протеканию неравновесных процессов образования вторичных структур на фрикционном контакте «инструмент – обрабатываемая деталь».

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
(проект № 22-19-00670, https://rscf.ru/project/22-19-00670/)

ЛИТЕРАТУРА

1. Кабалдин Ю.Г. Самоорганизация в процессах трения и смазки при резании //

Вестник машиностроения. 2003. № 10. С. 53–59.

2. Булгаревич С.Б. Термодинамические характеристики несамопроизвольных химических реакций, инициируемых трением // *Сборник трудов III Международного семинара «Контактное взаимодействие и сухое трение»*. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. С. 60–67.

3. Гершман И.С. Разработка износостойких материалов с помощью методов неравновесной термодинамики на примере скользящих контактов. Дис… докт. техн. наук. Москва. 2006. 234 с.

4. Мигранов М.Ш., Шустер Л.Ш. Интенсификация процесса металлообработки на основе использования эффекта самоорганизации при трении. М.: Машиностроение, 2005. 202 с.

5. Криони Н.К., Мигранов М.Ш., Шехтман С.Р. Наноструктурированные вакуумные ионно-плазменные покрытия. М.: Инновационное машиностроение, 2017. 367 с.

6. Семенов А.Б., Игнатова Е.В., Семенов Б.И., Романова В.С., Салибеков С.Е. Диссипативные процессы и структурные изменения материала диска в трибосистеме алюмоматричный композит – контртело // *Технология металлов*. 2006. №3. С. 26–33.

7. Верещака А.С., Григорьев С.Н., Табаков В.П. Методологические принципы создания функциональных покрытий для режущего инструмента // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2013. № 2(98). С. 18–32.

8. Шустер Л.Ш., Мигранов М.Ш., Чертовских С.В., Садыкова А.Я. Триботехнические характеристики титана с ультрамелкозернистой структурой // *Трение и износ*. 2005. Т. 26. № 2.С. 208–214.

9. Vereschaka A., Grigoriev S., Milovich F., Sitnikov N., Migranov M., Andreev N., Bublikov Yu., Sotova C. Investigation of tribological and functional properties of Cr,Mo-(Cr, Mo)N-(Cr,Mo,Al)N multilayer composite coating // *Tribology International*. 2021. V. 155. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X20306290 (дата обращения: 17.12.2021).

10. Migranov M.S., Migranov A.M., Minigaleev S.M., Shehtman S.R. Tribological properties of multilayer coatings for cutting tool // *Journal of Friction and Wear*. 2018. V. 39. № 3.P. 245–250.

11. Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Садыков А.Ф., Хусаенов И.И. Моделирование теплофизических явлений // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 3 (7). С. 13–21.

12. Мигранов А.М., Мигранов М.Ш., Колосова Н.В., Ахметова Э.З. Инновационные материалы и покрытия с эффектом адаптации при резании металлов// *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Техническиенауки»*. 2021. № 4 (12). С. 37–43.

Для цитирования: Мигранов М.Ш., Мигранов А.М. Комплексная оценка изнашивания режущих инструментов и композиционных покрытий с эффектом адаптации // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Техническиенауки». 2022. № 3 (15). С. 30–36.

УДК 621.941

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ПЕРЕУСТАНОВКА ТОНКОСТЕННОЙ ЗАГОТОВКИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ

А.П. АРХАРОВ, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: arharovanatoliy@yandex.ru

© Архаров А.П., 2022

Проведен анализ известных способов автоматической переустановки тонкостенных заготовок. Выявлены их достоинства и недостатки. Раскрыты сущность и реализация разработанного способа переустановки тонкостенной втулки. Проведено его сравнение по существенным признакам с аналогичными известными решениями. Отражены оригинальность способа и достигаемый технический результат.

Ключевые слова: автоматизация, переустановка, способ, заготовка, закрепление, патрон, точность.

ВВЕДЕНИЕ

В машиностроении при изготовлении деталей в виде тел вращения используют токарные обрабатывающие центры с числовым программным управлением (ЧПУ) с двумя шпинделями: основным и противошпинделем. В процессе обработки на таких станках возникает необходимость переустановки заготовок с одного шпинделя на другой. Для этой цели используют трехкулачковые самоцентрирующие механизированные патроны [1]. При переустановке производят закрепление заготовки патроном противошпинделя, при этом заготовка остается закрепленной в патроне основного шпинделя. Поэтому отклонение исходной формы поверхности, за которую выполняется закрепление, а также отклонение ее расположения относительно рабочей поверхности зажимных кулачков приводит к деформации заготовки. При переустановке тонкостенных заготовок, например в виде втулок, к упомянутому фактору добавляется искажение их исходной формы в поперечном сечении от действия сил закрепления. Однако использование трехкулачковых самоцентрирующих патронов не устраняет влияние этих факторов на точность установки.

Известен способ установки заготовки наружной поверхностью вращения и перпендикулярной к ее оси плоской поверхностью, осуществляемый с помощью патронов, причем для уменьшения деформации тонкостенных заготовок в патронах применяют наладки кулачков для закрепления по поверхности с большой дугой охвата [2]. Однако использование данного способа при автоматической переустановке тонкостенной заготовки, не имеющей подвижности в радиальном направлении при закреплении, снижает точность переустановки. Это вызвано неодновременным началом закрепления кулачками из-за погрешностей формы и расположения закрепляемой поверхности.

Для установки тонкостенных заготовок на токарных станках с ЧПУ применяется автоматический цанговый патрон, нажимной конус которого выполнен на подвижной тяге с возможностью взаимодействия с коническими участками цанги. Этот способ, описанный в [3], позволяет устанавливать заготовку, обладающую подвижностью в радиальном направлении. При переустановке тонкостенная заготовка не имеет такой

подвижности, что приводит к ее деформации вследствие неодновременного начала закрепления лепестками цанги.

Существует способ переустановки заготовки с закреплением ее по наружной цилиндрической поверхности, в котором используют трехкулачковый клиновой механизированный патрон с переменным движением кулачков [4]. Однако ограниченная площадь охвата заготовки зажимными кулачками не позволяет исключить искажения исходной формы тонкостенной заготовки при ее закреплении.

Переустановка тонкостенной заготовки с закреплением за ее отверстие может выполняться с использованием цангового механизированного патрона, нажимной конус которого при закреплении обладает подвижностью в осевом и радиальном направлениях [5]. Однако область применения этого способа ограничена чистовыми операциями, поскольку подвижность нажимного конуса в радиальном направлении увеличивает податливость технологической системы при последующей механической обработке.

Проблемой является разработка способа переустановки тонкостенной заготовки с закреплением ее за наружную поверхность и достижением при этом повышения надежности переустановки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Процесс создания новых объектов предполагает применение анализа и синтеза [6]. Для решения поставленной проблемы в работе использован анализ известных способов переустановки тонкостенных заготовок на станках токарной группы с выявлением существенных признаков. При разработке усовершенствованного способа применялся синтез таких признаков, которые в совокупности обеспечивают новизну и оригинальность способа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В разработанном способе переустановки тонкостенной заготовки в механизированный цанговый патрон получено решение поставленной задачи и достигнут технический результат. Его основу составляет способ установки заготовки в двухкулачковом механизированном патроне [5].

Сущность разработанного способа заключается в следующем.

Заготовку устанавливают и закрепляют на базирующем элементе, размещенном на исходной позиции. Механизированный цанговый патрон с зажимными элементами в виде лепестков цанги и нажимными элементами в виде переменно движущихся независимо друг от друга ползунов устанавливают напротив заготовки. Подводят патрон к базирующему элементу с заходом его отверстием цанги на заготовку. Перемещают лепестки на сближение с наружной поверхностью заготовки путем движения его ползунов вдоль оси цанги. В момент касания наружной поверхности одним из лепестков приостанавливают перемещение ползуна, сопряженного с коснувшимся лепестком, и упомянутого лепестка до момента касания заготовки всеми лепестками. Затем закрепляют заготовку одновременно всеми лепестками, открепляют ее в базирующем элементе, после чего отводят патрон с заготовкой в первоначальное положение.

Использование цангового патрона с нажимными элементами в виде переменно движущихся независимо друг от друга ползунов, по сравнению с использованием патрона с нажимным конусом в известном способе [5], позволяет уменьшить деформацию переустанавливаемой тонкостенной заготовки. Это достигается даже при

наличии у наружной поверхности заготовки погрешности формы и отклонений расположения ее относительно базовой поверхности заготовки и оси цангового патрона.

Кроме того, выравнивание давления на лепестки, выполняемое в разработанном способе путем переменного движения ползунов вдоль оси цанги с воздействием каждого из них только на один лепесток, позволяет исключить необходимость радиального смещения нажимных элементов. Это увеличивает жесткость сопряжения «заготовка – цанговый патрон» и уменьшает возможное смещение нажимных элементов в радиальном направлении от действия сил резания при последующей механической обработке. Таким образом, разработанный способ обеспечивает повышение надежности переустановки тонкостенной заготовки.

На рисунке показана схема осуществления способа.

Тонкостенную заготовку 1 с наружной поверхностью вращения 2 устанавливают на базирующий элемент 3 и закрепляют в нем. Напротив заготовки устанавливают механизированный цанговый патрон 4 с зажимными элементами в виде лепестков 5, 6 и 7 и нажимными элементами в виде ползунов 8, 9 и 10 с переменными движениямивдоль оси цанги. Патрон подводят к базирующему элементу с заведением заготовки в отверстие патрона. Перемещают лепестки в радиальном направлении на сближение с наружной поверхностью заготовки путем перемещения ползунов вдоль оси цанги. Из-за отклонения формы наружной поверхности и отклонения от соосности Δ оси цанги относительно оси упомянутой поверхности один из лепестков цанги, например 5, может коснуться этой поверхности раньше, чем другие. Поэтому перемещение ползуна 8, сопряженного с лепестком 5, а значит, перемещение упомянутого лепестка приостанавливают. При этом движение остальных ползунов продолжают. Аналогично приостанавливают движение каждого следующего ползуна при касании сопряженного с ним лепестка с наружной поверхностью. Возобновляют все прерванные движения в момент касания последнего лепестка с наружной поверхностью. Затем закрепляют заготовку за упомянутую поверхность одновременно всеми лепестками, открепляют ее в базирующем элементе, а патрон с заготовкой возвращают в исходное положение.

Таким образом тонкостенную заготовку переустанавливают в механизированный цанговый патрон, достигая при этом повышения надежности переустановки.

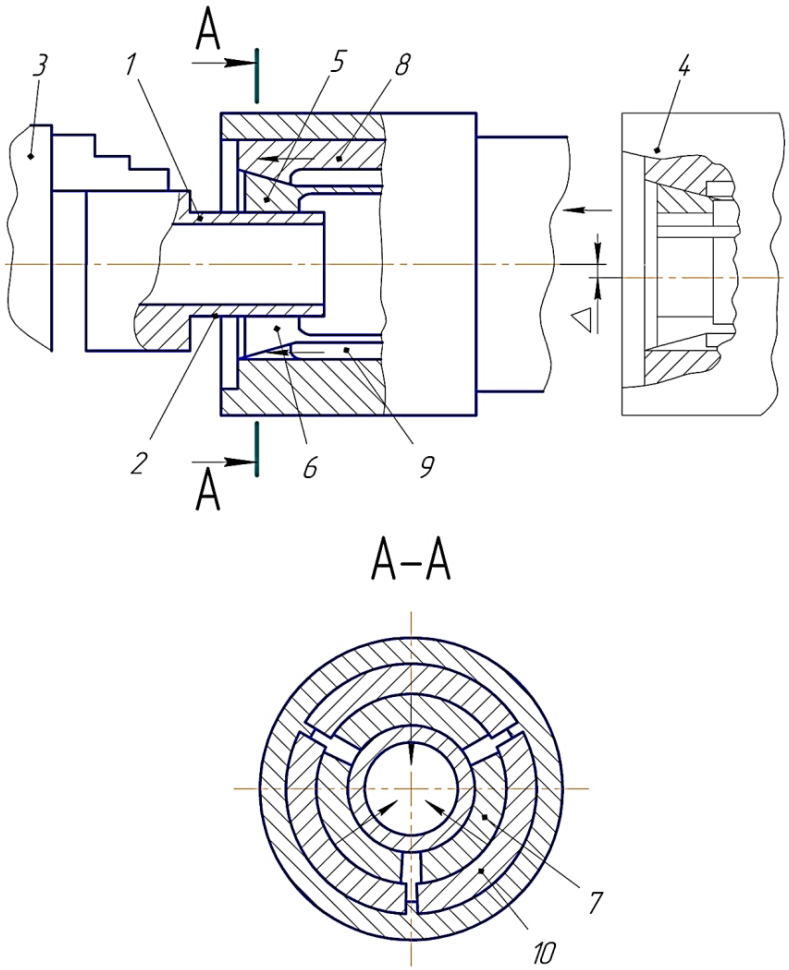


Схема автоматической переустановки тонкостенной заготовки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный структурный анализ выявил достоинства и недостатки способов, используемых для установки и переустановки тонкостенных заготовок на технологическое оборудование. Разработанный способ переустановки с использованием механизированного цангового патрона с переменным движением нажимных элементов позволяет устранить указанныенедостатки и обеспечить повышение точности и надежности переустановки. Способ может быть использован на машиностроительных предприятиях при автоматических процессах загрузки и переустановки тонкостенных заготовок на технологическом оборудовании, а такжепри его разгрузке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов Ю.И., Маслов А.Р., Байков А.Н. Оснастка для станков с ЧПУ: справочник. М.: Машиностроение, 1990. 510 с.

2. Дальский А.М., Суслов А.Г., Косилова А.Г. [и др.].Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. М.: Машиностроение-1, 2003. Т. 2. 901 с.

3. Патент РФ 170965. *Автоматический цанговый патрон* / Курилов И.Н., Чуприков А.О., Никитин И.В. Заявл. 29.12.2015. Опубл. 16.05.2017, Бюл. № 14.

4. Архаров А.П. Способ переустановки заготовки в трехкулачковый механизированный патрон // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия«Техническиенауки».* 2021. № 3 (11). С. 20–23.

5. Патент РФ 2717760. *Способ переустановки тонкостенной заготовки в механизированный патрон* / Архаров А.П. Заявл. 07.10.2019. Опубл. 25.03.2020, Бюл. № 9.

6. Хилл П. Наука и искусство проектирования. Методы проектирования, научное обоснование решений М.: Мир, 1973. 264 с.

Для цитирования: Архаров А.П. Автоматическая переустановка тонкостенной заготовки на технологическом оборудовании // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Техническиенауки». 2022. № 3 (15). С. 37–41.

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.928.26

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЖЕЛОБООБРАЗНЫХ ВАЛКОВЫХ СОРТИРОВОК

А.В. КОНДРАТЬЕВ, д-р техн. наук, С.М. КОЧКАНЯН, канд. техн. наук,
Т.И. ЛЫСЕНКО, ст. препод., А.А. ГУСАРОВ

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина,22, e-mail: avkondr@ya.ru

© Кондратьев А.В., Кочканян С.М.,
Лысенко Т.И., Гусаров А.А., 2022

Представлены результаты сравнительных исследований эффективности работы желобообразной сортировки с двумя видами интенсифицирующих устройств – подвижных фартуков и шнекового интенсификатора. Оценка эффективности работы валковых сортировок проводилась на основе многофакторного планирования эксперимента для рациональных параметров рассматриваемых вариантов разделительных устройств при фракционировании гравийной смеси.

*Ключевые слова:*желобообразная валковая сортировка, подвижные фартуки, шнековый интенсификатор, частота вращения шнека, частота вращения дисков, скорость движения фартуков, подача материала, эффективность грохочения, гравий.

ВВЕДЕНИЕ

Фракционирование гравия и щебня – одна из важнейших операций в технологической цепочке добычи и переработки нерудных строительных материалов для дорожного, промышленного и гражданского строительства. От качественных и количественных показателей эффективности проведения этих операций во многом зависит себестоимость конечной продукции: автомобильных дорог, зданий и сооружений (мостов, тоннелей, эстакад и т.д.). Поэтомуактуальной задачей является совершенствование существующих и создание новых сортирующих устройств, обеспечивающих высокую результативность работы. С этой позициинесомненный интереспредставляют валковые сортировки, эффективность и производительность которых при разделении сыпучих смесей может быть существенно выше по сравнению с другими сепарирующими устройствами [1,2]. В данной статье приводятся результаты сравнительных испытаний работоспособности желобообразных валковых сортировок с различными интенсифицирующими устройствами.

Отличительной особенностью желобообразного разделительного устройства является зигзагообразное движение материала по просеивающей поверхности, что значительно увеличивает величину пути частицы с одновременным распределением зерен по ширине желоба в зависимости от их крупности, что, в свою очередь, способствует ускоренному прохождению мелких частиц в отверстиях валкового сита [3,4].

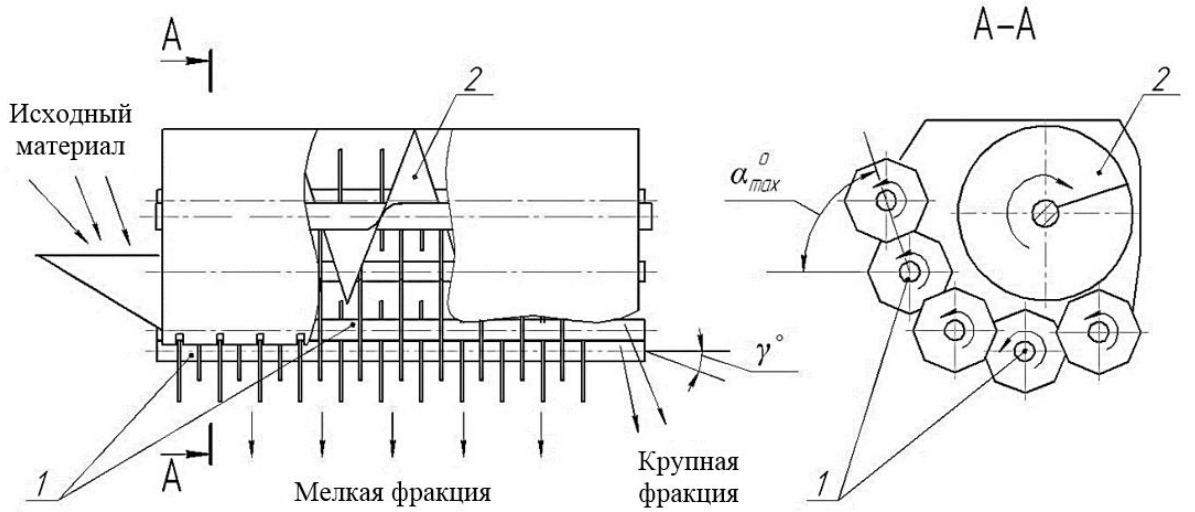
В ходе проводимых исследований планировалось решение следующих вопросов:

1) анализ многофакторного эксперимента на стенде желобообразной валковой сортировки с подвижными фартуками и со шнековым интенсификатором для определения рациональных параметров разделительных устройств;

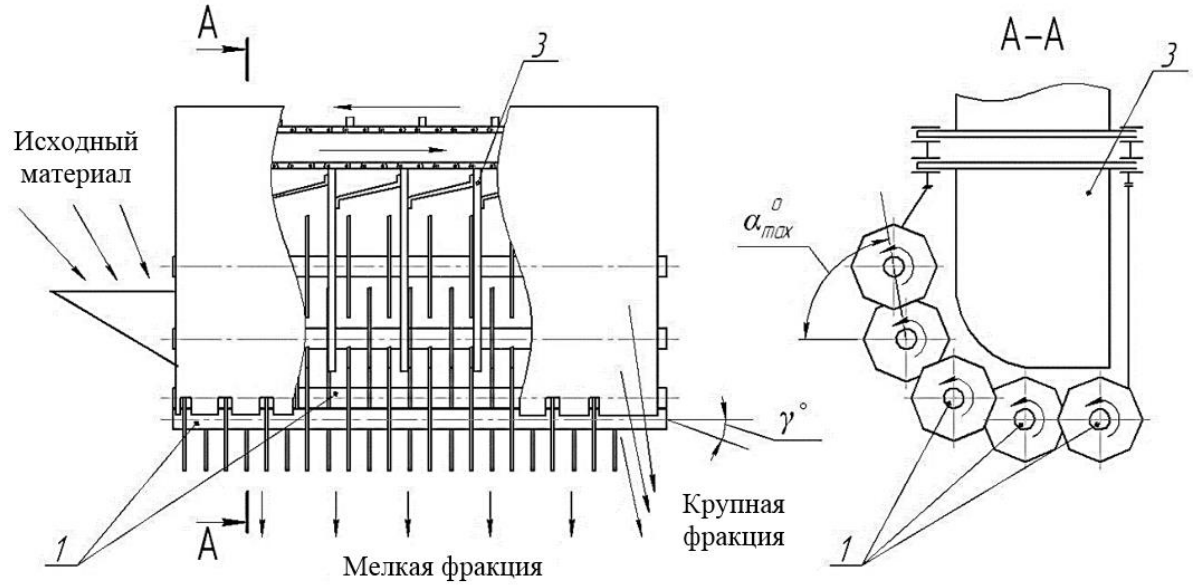
2) сравнительная оценка эффективности работы желобообразной валковой сортировки и рассматриваемых вариантов интенсифицирующих устройств, используемых при грохочении гравийной смеси.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Схемы экспериментальных установок желобообразной валковой сортировки со шнековым интенсификатором и с подвижными фартуками представлены на рис. 1.



(а)



(б)

Рис.1. Схемы желобообразной сортировки:
со шнековым интенсификатором(а);с подвижными фартуками (б)

Каждая валковая сортировка состоит из ряда параллельных валов 1 с многогранными дисками, поверхность которых образует желоб. При этом вдоль валов с

дисками установлен шнековый интенсификатор 2 (см. рис.1а) и подвижные фартуки 3 (см. рис.1б). В первом варианте (см. рис.1а) материал, перемещаемый в сторону выгрузки одновременно вращающимися дисками и шнеком 2, распределяется по ширине желоба, двигаясь вдоль валов. Во втором варианте (см. рис.1б) материал передвигается в сторону выгрузки за счет подвижных фартуков, а его распределение по ширине желобо-образной поверхности осуществляется только посредством вращающихся дисков.

Ранее выполненные исследования позволили определить некоторые рациональные параметры для сортировок со шнековым интенсификатором и с подвижными фартуками [5–7]. Так, например, для устройства схемы (а) продольный угол наклона валов желоба $\gamma = -4°$, а максимальный угол наклона желобообразной поверхности $\alpha_{max} = 65°$. Аналогичные параметры для сортировки (б) были следующие: $\gamma = -6°$, $\alpha_{max} = 60°$. Экспериментально было выявлено по три основных фактора для каждой схемы: частота вращения дисков n, подача материала на желоб q, частота вращения шнека $n_{шн}$ (схема а), скорость движения фартуков $v_ф$ (схема б). Интервалы варьирования выбранных основных факторов для трехфакторного эксперимента приведены в таблице.

В качестве просеивающего материала использовали гравийную смесь с процентным соотношением зерен верхнего класса к нижнему 40:60. Величина просеивающего промежутка между дисками составляла 40 мм.

Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Кодовое обозначение	Интервалы варьирования	Натуральные уровни факторов				
			+1,682	+1	0	–1	–1,682
n – частота вращения дисков, об/мин	X_1	21	141	126,7	105,7	84,7	70,4
$n_{шн}$ – частота вращения шнека, об/мин	X_2 (схема а)	6	51	47	41	35	31
$v_ф$ – скорость движения фартуков, м/с	X_2 (схема б)	0,15	0,70	0,60	0,45	0,30	0,20
q – подача материала, кг/мин	X_3	160	630	520	360	200	90

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам проведенного эксперимента путем реализации композиционного ротатабельного плана второго порядка для каждой схемы желобообразной валковой сортировки были получены следующие уравнения регрессии, отображающие влияние основных факторов на эффективность грохочения гравия:

для сортировки со шнековым интенсификатором

$$E_р = 101{,}344\,434\,25 - 0{,}007\,077\,9\,n - 0{,}041\,230\,78 n_{шн} - 0{,}001\,639\,82\,q; \quad (1)$$

для сортировки с подвижными фартуками

$$E_р = 77{,}049 + 0{,}34\,n + 26{,}66 v_ф + $$
$$+ 0{,}004\,4\,q - 0{,}001\,7 n^2 - 30{,}533 v_ф^2 - 0{,}000\,014\,4\,q^2. \quad (2)$$

С использованием уравнений (1) и (2) были получены зависимости эффективности E грохочения гравия во всем диапазоне изменения частоты n вращения валов с дисками для сортировки со шнековым интенсификатором и для устройства с подвижными фартуками (рис. 2). Графические зависимости определяли при достаточно высокой подаче материала на валковое желобообразное сито (q = 520 кг/мин). При этом кинематические параметры интенсификаторов имели следующие значения: $n_{шн}$= = 31 об/мин; $v_ф$ = 0,45 м/с. Представленные на рис. 2 данные показывают, что на сортировке со шнековым интенсификатором происходит незначительное снижение эффективности E от 98,7 до 98,2 % с увеличением частоты вращения валов с дисками (линия 1). На сортировке же с подвижными фартуками с повышением n сначала наблюдался рост эффективности E от96,8 до98,2 %, а затем,послеувеличения частоты вращения дисков до 113 об/мин и более, происходило постепенное уменьшение E до 95,4 % (линия 2). Поэтому можно отметить более результативную работу сортировки со шнековым интенсификатором во всем интервале изменения n по сравнению с устройством с подвижными фартуками.

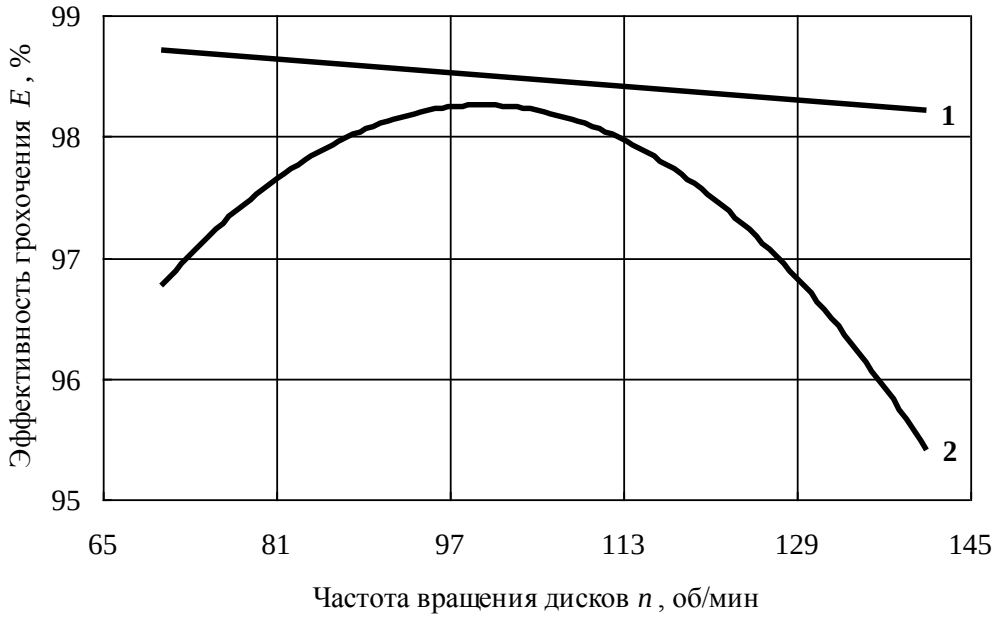


Рис. 2. Зависимость эффективности грохочения гравия
от частоты вращения валовс дисками на сортировках: 1 – со шнеком;
2 – с фартуками

Следующие исследования касались изучения влияния кинематических параметров интенсификаторов на эффективность грохочения гравия.

Вначале при помощи уравнения (1) при n = 70,4 об/мин получили линейную зависимость E от частоты вращения шнека (рис. 3). Повышение частоты вращения шнека приводило к уменьшению эффективности грохочения от 98,7 до 97,9 %. Это, в свою очередь, показывает, что минимальная частота вращения шнека ($n_{шн}$ = 31 об/мин) так же, как и минимальная частота вращения валов с дисками (n = 70,4 об/мин), на сортировке со шнековым интенсификатором наиболее рациональна в интервале величин,представленных в таблице.

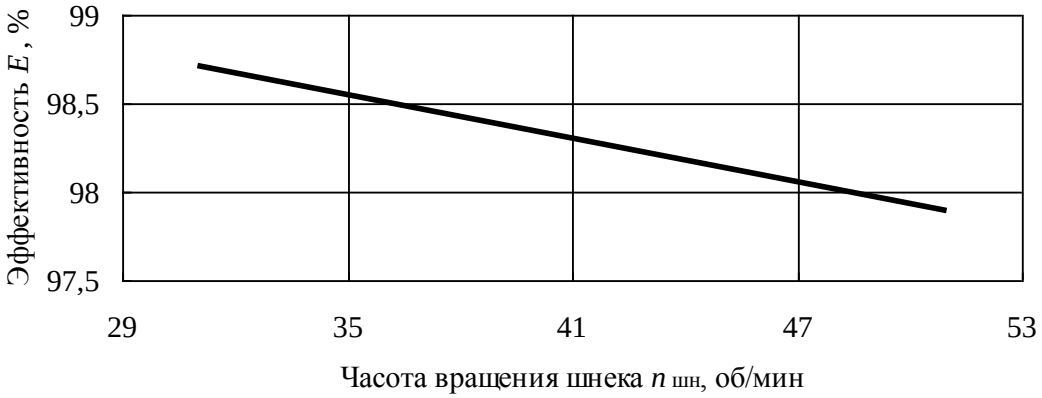


Рис. 3. Зависимость эффективности грохочения
от частоты вращения шнека

Затем с помощью уравнения (2) при n = 105 об/мин был установлен характер влияния скорости движения фартуков на эффективность грохочения каменного материала на сортировке с подвижными фартуками (рис. 4). Полученная зависимость показывает наибольшую эффективность E = 98,2 % при $v_ф$ = 0,45 м/с, т.е. согласно численному значению скорости фартуков в центре интервала табличных показателей $v_ф$. Уменьшение или увеличение скорости фартуков относительно этого значения приводит к снижению эффективности грохочения гравия.

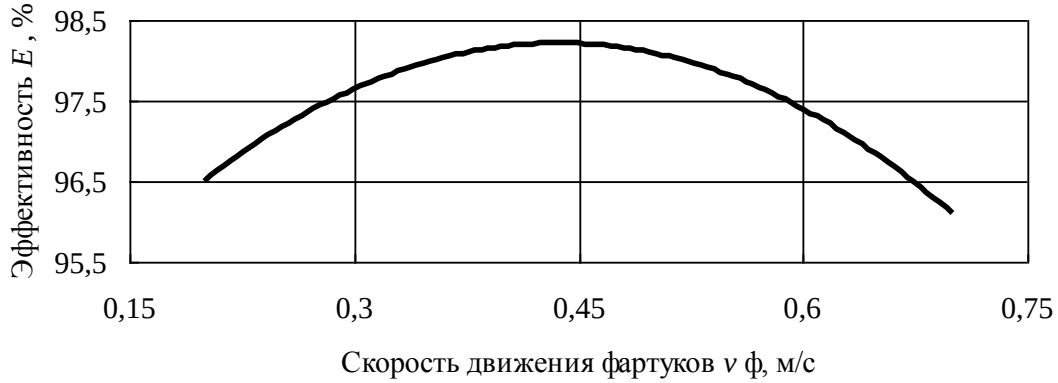


Рис. 4. Зависимость эффективности грохочения
от скорости движения фартуков

На заключительном этапе исследований были получены закономерности влияния на эффективность грохочения величины подачи каменного материала на желобообразную валковую сортировку с рассматриваемыми вариантами интенсифицирующих устройств (рис. 5).

Представленные на рис. 5 зависимости, рассчитанные по уравнениям (1) и (2), соответствуют следующим исходным данным:

n = 70,4 об/мин, $n_{шн}$ = 31 об/мин – для сортировки со шнековым интенсификатором;

n = 115 об/мин, $v_ф$ = 0,45 м/с – для сортировки с подвижными фартуками.

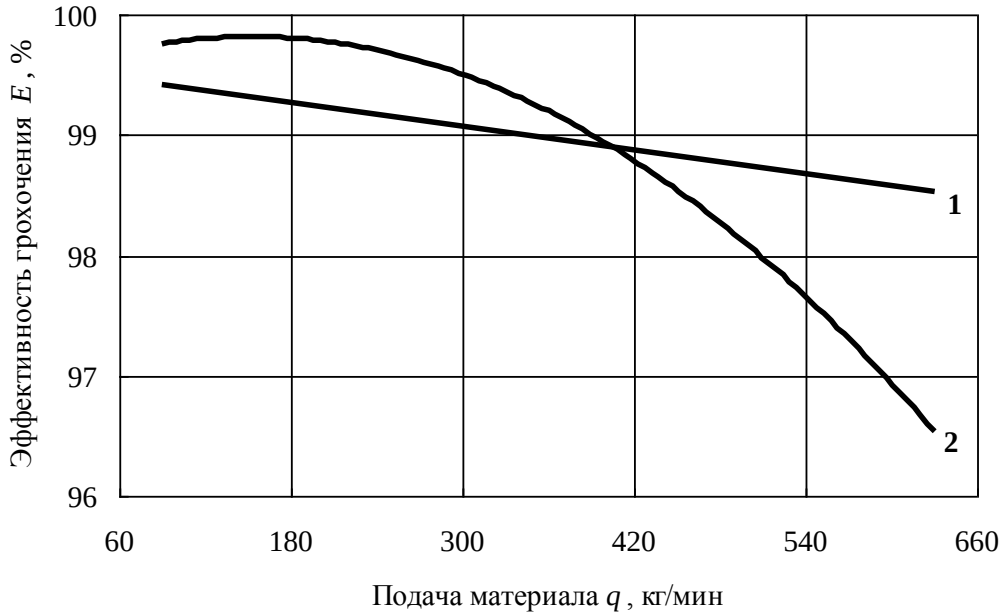


Рис.5. Влияние подачи материала на эффективность его просеивания на сортировках: 1 – со шнеком; 2 – с фартуками

Анализируя характер зависимостиE отq, следует отметить более стабильную работу желобообразной сортировки со шнековым интенсификатором (линия 1), когда эффективность грохочения гравия во всем интервале подач материала варьировалась в пределах всего одного процента, не опускаясь ниже 98,5 %. В случае использования на сортировке подвижных фартуков варьирование эффективности грохочения составило уже 3 % и наименьший показатель E = 96,5 % соответствовал наибольшей подаче материала (q = 630 кг/мин) на валковое сито. Поэтому, ориентируясь на максимальную производительность разделительного устройства при высоких показателях эффективности (E > 98 %) грохочения каменных материалов, следует отдать предпочтение желобообразной сортировке со шнековым интенсификатором.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом сравнительное исследование сортировок показало достаточно результативную их работу с рассматриваемыми видами интенсифицирующих устройств, поскольку эффективность грохочения гравия во всех экспериментах была выше 95 %. Некоторое преимущество использования на валковом сите шнекового интенсификатора объясняется более активным распределением просеиваемого материала по стороне желоба, которое осуществляется как за счет вращающихся дисков, так и за счет шнековых лопастей. Проведение дальнейших исследований по совершенствованию желобообразных валковых сортировок с активными интенсификаторами позволит окончательно оптимизировать параметры разделительных устройств и рекомендовать их для внедрения на сортировочных комплексах дорожно-строительных машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратьев А.В. Интенсификация процесса разделения сыпучих материалов на валковых сепараторах: монография. Тверь: ТвГТУ, 2012. 95 с.

2. Абдуллах А.К. Обоснование конструкции и параметров валкового грохота для сортировочных комплексов дорожно-строительных машин. Автореф. дисс… канд. техн. наук. Тверь. 2014. 19 с.

3. Патент РФ 2317864 *Устройство для грохочения сыпучих материалов*/ Кондратьев А.В., Груздев С.В., Кочканян С.М.,Павлов Ю.Н., Семин А.В. Заявл. 12.09.2006.Опубл. 27.02.2008, Бюл. № 6.

4. Патент РФ 126632. *Устройство для сортировки сыпучих материалов*/ Кондратьев А.В., Кочканян С.М., Перхуров А.И., Русинкевич В.А., Вересов М.И. Заявл. 29.10.2012.Опубл. 10.04.2013, Бюл. № 10.

5. Русинкевич В.А., Кочканян С.М., Кондратьев А.В. Результативность грохочения гравия в зависимости от параметров валковой желобообразной сортировки со шнековым интенсификатором // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2014. №5. С. 188–192.

6. Кондратьев А.В., Павлов Ю.Н., Перхуров А.И., Ренкус Т.И. Результаты исследования процесса просеивания гравия на желобообразном валковом грохоте с активным интенсификатором // *Строительные и дорожные машины*. 2015. № 10. С. 58–60.

7. Кондратьев А.В., Кочканян С.М., Ренкус Т.И., Вересов М.И., Корнеев Е.А. Результаты сравнительных исследований применения активных интенсификаторов на желобообразной валковой сортировке // *Мир транспорта и технологических машин*. 2016. № 3(54). С. 39–45.

Для цитирования: Кондратьев А.В., Кочканян С.М., Лысенко Т.И., Гусаров А.А.Сравнительная оценка эффективности работы желобообразных валковых сортировок // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Техническиенауки». 2022. № 3 (15). С. 42–48.

УДК 622.331.002.5

АНАЛИЗ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЧАСТИЦУ ФРЕЗЕРНОГО ТОРФА В ЗОНЕ ВСАСЫВАЮЩЕГО ФАКЕЛА ПНЕВМОУБОРОЧНОЙ МАШИНЫ

А.Л. ЯБЛОНЕВ, д-р техн. наук, Д.М. ЩЕРБАКОВА, аспирант

Тверской государственный технический университет,
170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: alvovich@mail.ru

© Яблонев А.Л., Щербакова Д.М., 2022

Эффективность всасывания фрезерной крошки пневматическими торфоуборочными машинами во многом определяется скоростью воздушного потока, создаваемого пневмосистемой. Попытки аналитического определения данной скорости предпринимались рядом исследователей не только для торфа, но и в смежных отраслях, а именно при изучении и оптимизации процессов обеспыливания и пневмотранспорта древесных опилок. Однако, в силу специфики торфяной фрезерной крошки, тема не утратила своей актуальности. В ходе исследования было установлено, что на отрыв

торфяной частицы от подстилающей поверхности влияет не сила Магнуса, как предполагалось ранее, а подъемная сила, вызванная разницей давлений над и под частицей. Разработаны математические модели, позволяющие рассчитать минимальную скорость воздушного потока, необходимую для страгивания торфяной частицы с места и отрыва ее от подстилающей поверхности.

Ключевые слова: торф, пневмоуборочная машина, всасывающее сопло, скорость воздушного потока, лобовая сила, подъемная сила, сила Магнуса, уравнение Бернулли.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ силового воздействия воздушного и жидкостного потоков на частицы различных материалов производился многими учеными [1–5]. Однако в связи с тем, чтофрезерный торф имеет свою ярко выраженную специфику, в представляемой статье продолжено обсуждение данной темы.Обоснованный подход к этому вопросу позволит аналитически определить скорость воздушного потока в зоне действия всасывающего факела, необходимую для страгивания торфяной частицы с места и отрыва ее от подстилающей поверхности торфяной залежи.

Для упрощения задачи рассмотрим неподвижную частицу торфа шарообразной формы, лежащую на подстилающей поверхности торфяной залежи и находящуюся в зоне действия всасывающего факела сопла пневмоуборочной машины. Теоретически на частицу в таком положении может оказывать влияние ряд сил:тяжести $F_т$, адгезии $F_{ад}$, сцепления $F_{сц}$ (вызвана воздействием на частицу окружающих частиц и подстилающей поверхности), трения $F_{тр}$, лобового давления $F_л$ (обусловлена воздействием на частицу воздушного потока), подъемная $F_п$ (вызывающая отрыв частицы от подстилающей поверхности).

Рассмотрим каждую из этих сил и проанализируем механизм их появления и действия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Начало координат совместим с центром неподвижной частицы. Ось *0X* направим в сторону движения воздушного потока и последующего поступательного движения частицы. Ось *0Z* направим вверх – в сторону последующего отрыва частицы от подстилающей поверхности торфяной залежи (рис. 1).

Сила тяжести неотделима от частицы и действует независимо от присутствия (отсутствия) всасывающего факела воздушного потока. Для частиц шарообразной формы сила тяжести находится из уравнения

$$F_т = mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_т g, \quad (1)$$

где m – масса частицы, кг; g = 9,81 м/с^2 – ускорение свободного падения; r – радиус частицы, м; $\rho_т$ – плотность торфяной частицы, кг/м^3.

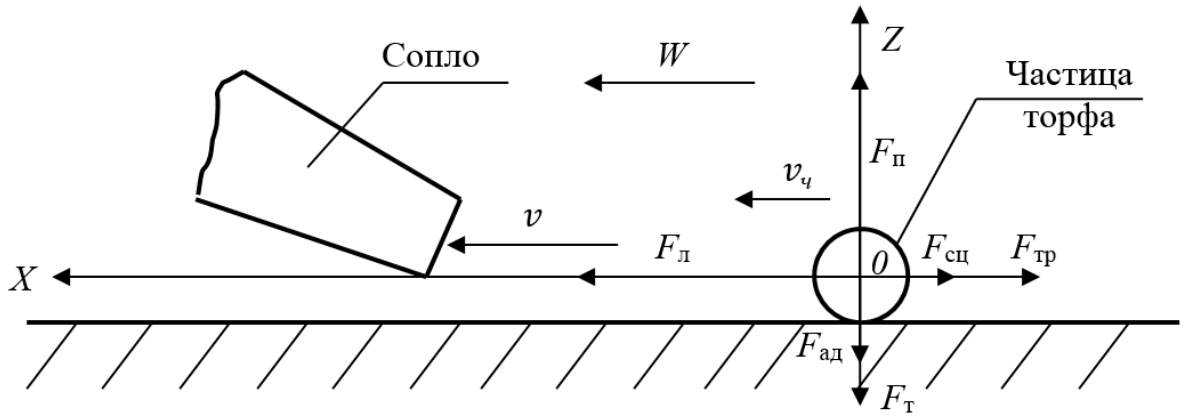


Рис. 1. Расчетная схема к анализу сил, действующих на частицу в момент ее нахождения в зоне действия всасывающего факела: $v_ч$ – скорость частицы; v – скорость воздушного потока; W – поступательная скорость движения пневмоуборочной машины

Сила адгезиив работах [1, 5] определяется по формуле

$$F_{ад} = \frac{h\omega}{8\pi z^2} r,$$

где $h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; ω – угловая скорость вращения частицы, $с^{-1}$; z – расстояние от частицы до ограничивающей поверхности, м.

В работе [2] сила адгезии вообще не учитывается. Ее природа заключается в возникновении вокруг частицы некоторого поверхностного слоя (пленки) и последующем межмолекулярном взаимодействии в поверхностном слое [6]. По сути, адгезия есть прилипание. Такому случаюидеально соответствовали бы частицы торфа непосредственно во влажной торфяной залежи. Однако частицы фрезерного торфа, достигшие кондиционной уборочной влажности (40–45 %), можно лишь с очень большим допущением считать покрытыми влажным поверхностным слоем.

Теория Б.В. Дерягина основана на предположении, что сила адгезии является функцией толщины зазора h между частицами или между частицей и подстилающей поверхностью. Для случая взаимодействия твердых частиц между собой формула для силы адгезии имеет вид [7]:

$$F_{адч} = 2\pi \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \cdot (2\sigma_1 - \sigma_2),$$

где r_1 и r_2 – радиусы шарообразных частиц, м (в нашем случае $r = r_1 = r_2$);σ_1 и σ_2 – поверхностное натяжение на границе фаз 1 и 2 (в нашем случае $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 \approx 0{,}08$Н/м [7]).

Таким образом, для взаимодействия одинаковых частиц сила адгезии может быть определена по формуле

$$F_{адч} = \pi r \sigma.$$

Для случая взаимодействия твердых частиц с плоской подстилающей поверхностью сила адгезии имеет вид [7]:

$$F_{\text{ад}_\text{п}} = 4\pi r\sigma.$$

Следовательно, суммарная сила адгезии вычисляется по формуле

$$F_{\text{ад}} = F_{\text{ад}_\text{ч}} + F_{\text{ад}_\text{п}} = 5\pi r\sigma.$$

Однако с учетом того, что подстилающая поверхность также представляет собой совокупность множества частиц, адгезию с подстилающей поверхностью можно не учитывать.Тогда

$$F_{\text{ад}} = \pi r\sigma.$$

По нашему мнению, смысл сил сопротивлений, возникающих между частицами и подстилающей поверхностью,более глубоко отражает понятие сцепления. Причем речь здесь идет не о «структурном» сцеплении, которое присутствует при сдвигающих напряжениях в монолите торфа, а о «восстанавливающемся» сцеплении, вызванном шероховатостями поверхностей соприкасающихся частиц торфа [8]. В таком случае сила сцепления,вызванная воздействием на частицу окружающих частиц и подстилающей поверхности, может быть найдена по формуле

$$F_{\text{сц}} = cS_{\text{сц}},$$

где c – сцепление, Па; $S_{\text{сц}}$ – площадь сцепления, м^2 (для шарообразной частицы$S_{\text{сц}} \approx \frac{1}{2}4\pi r^2$).

Сцепление для торфа нарушенной структуры можно определить по формуле [9]:

$$c = 1{,}132 - \frac{0{,}08W_\text{п}}{100} + 0{,}003\,8\left(\frac{W_\text{п}}{100}\right)^2,$$

где $W_\text{п}$ – полная влагоемкость, зависящая от вида торфяной залежи.

Например, для верхового торфа степенью разложения R = 5–10 % $W_\text{п}$ = 1 500 %, а для низинного с R = 35–40 % $W_\text{п}$ = 700 % [10]. Для этих условийсцепление cсоставляет 0,787 Па для верхового и 0,758 Па для низинного торфа.

Сила трения обусловлена трением покоя между частицей и окружающими поверхностями. Согласно рис. 1 она может быть найдена по формуле

$$F_{\text{тр}} = f(F_\text{т} + F_{\text{ад}} - F_\text{п}),$$

где f – коэффициент трения частиц фрезерного торфа по подстилающей поверхности торфяной залежи; $F_\text{т}$– сила тяжести, Н; $F_\text{п}$ – подъемная сила, Н, возникающая при приближении сопла к частице и фактически не действующая на частицу при ее

максимальном удалении от сопла на уровне длины оси активной зоны всасывающего факела.

Коэффициент трения при этом определяется как тангенс угла внутреннего трения φ:

$$f = tg\varphi,$$

а угол внутреннего трения для фрезерного торфа составляет 32–45° [11]. Соответственно, коэффициент трения находится в пределах 0,62–1,0.

Сила лобового давлениявызвана прямым сопротивлением частицы при воздействии на нее потока жидкости или газа. Именно она является основной активнойсилой, причиной страгивания частицы с места и последующего возникновения подъемной силы. Силу лобового давления можно определить по зависимостям:

для ламинарного режима обтекания твердого тела [12]:

$$F_{\text{Л}_\text{л}} = 6\pi\mu r(v - W);(2)$$

для турбулентного режима обтекания твердого тела [13]:

$$F_{\text{Л}_\text{т}} = c_\text{л}\frac{\rho_\text{в}}{2}S_\text{м}(v - W)^2, \quad (3)$$

где $c_\text{л}$ – коэффициент лобового сопротивления частицы (для шарообразных частиц в потоке, характеризующемся числом Рейнольдса Re = 10^4–$4\cdot10^5$$c_\text{л}$ = 0,44–0,1 [14]);$\rho_\text{в}$ – плотность воздуха, кг/м^3; $S_\text{м}$ – площадь Миделя сечения частицы, м^2 (для шарообразной частицы радиусом $rS_\text{м} = \pi r^2$);v – средняя скорость воздушного потока, воздействующего на частицу, м/с; μ – динамический коэффициент вязкости воздуха ($\mu = \nu\rho_\text{в}$), Па·с; ν – кинематический коэффициент вязкости воздуха, м^2/с; W – скорость поступательного движения торфяной пневмоуборочной машины (W = = 5–8 км/ч = 1,4–2,2 м/с).

Динамический коэффициент вязкости для воздуха можно определить по формуле Сазерланда, отражающей зависимость вязкости газа от температуры вещества. С повышением температуры вязкость газа,в отличие от жидкостей, повышается [15]:

$$\mu = \mu_0\frac{T_0 + C}{T + C}\left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2},$$

где μ_0 – динамический коэффициент вязкости при нормальных условиях (н. у.),μ_0 = = 18,27 · 10^{-6}Па·с;T_0 – температура воздуха при н. у.,T_0 = 293,15 К; T– температура воздуха, К;C – константа Сазерленда,C = 120 К.

Рассматривая шарообразную частицу торфа диаметром 25 мм и погодные условия, характерные для проведения пневматической уборки, отраженные в таблице, можно по формулам (2) и (3) рассчитать значения силы лобового давления в зависимости от скорости воздушного потока для ламинарного и турбулентного режимов движения воздуха.

Параметры состояния атмосферного воздуха [16]

Температура окружающего воздуха t, °С	20	25	30
Плотность воздуха ρ, кг/м^3	1,205	1,185	1,165
Кинематический коэффициент вязкости воздуха ν, м^2/с	$15{,}06 \cdot 10^{-6}$	$15{,}53 \cdot 10^{-6}$	$16 \cdot 10^{-6}$
Динамический коэффициент вязкости воздуха μ, Па·с	$18{,}1 \cdot 10^{-6}$	$18{,}35 \cdot 10^{-6}$	$18{,}6 \cdot 10^{-6}$

Результат расчетов по зависимостям (2) и (3) показал, что сила лобового давления, создаваемая при турбулентном режиме при одних и тех же значениях скорости воздушного потока, в среднем на три порядка выше силы, создаваемой приламинарном режиме движения. Следовательно, при пневматической уборке торфа необходим именно турбулентный режим движения воздушного потока. Параметры вязкости воздуха не оказывают значительного влияния на лобовую силу давления.

Бесспорно, одной из самых важных из всех вышеперечисленных сил является подъемная. Если поток жидкости (газа) обтекает частицу как сверху, так и снизу (причем местная скорость линий тока снизу меньше, чем сверху), то по закону Бернулли меняется и давление: над частицей оно меньше, чем под ней. В результате возникает вертикальная аэродинамическая подъемная сила, причиной которой является градиент скорости по высоте [17]. Под действием градиента скорости силы трения отличаются по величине на верхней и нижней сторонах частицы, что может привести к возникновению крутящего момента. При этом влияние градиента скорости на величину крутящего момента пропорционально размеру частицы. Вращение частицы под действием крутящего момента, сопровождающееся столкновениями ее с другими частицами, происходит вокруг оси, нормальной к направлению потока, но лежащей в горизонтальной плоскости. Неравномерная скорость обтекания и вращения частиц вызывает циркуляцию воздуха по контуру частицы. Если направление вращения частицы и скорости потока совпадают, то скорость течения увеличивается, если же они противоположны – уменьшается. По этой причине давление под частицей возрастает, а над частицей – уменьшается. Отсюда и возникает действующая вертикально вверх сила Магнуса, определить которую можно, воспользовавшись, например, формулой Н.Е. Жуковского [1, 4]:

$$F_{\text{м}} = \rho_{\text{в}} \frac{\pi r^3}{2} v \frac{dv}{dz}. \quad (4)$$

С учетом скорости шарообразной частицы $v_{ш}$ и скорости воздушного потока $v_{в}$ (рис. 2) уравнение (4) может быть приведено к виду

$$F_{м} = \frac{\pi}{\alpha}\rho_{в} r^{2} v_{в} v_{ш}, \quad (5)$$

где α – угол направления воздушного потока, рад (при расположении частицы на расстоянии, равном длине оси активной зоны всасывающего факела, можно принять, что $\alpha \approx \pi$).

Для условия отрыва частицы от подстилающей поверхности необходимо выполнение условия

$$F_{м} \geq F_{т}. \quad (6)$$

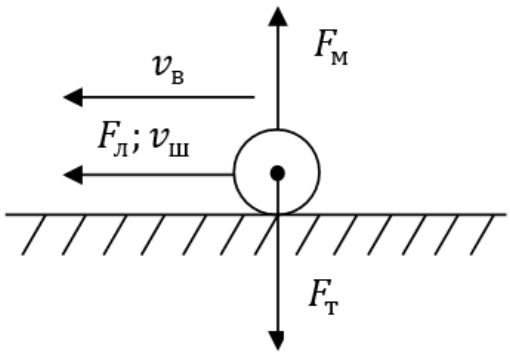


Рис. 2. Появление силы Магнуса

Подставив выражения (1) и (5) в неравенство(6), получим:

$$\frac{\pi}{\alpha}\rho_{в} r^{2} v_{в} v_{ш} \geq \frac{4}{3}\pi r^{3} \rho_{т} g, \quad (7)$$

откуда можно выразить скорость шарообразной частицы:

$$v_{ш} \geq \frac{\frac{4}{3}\pi r^{3} \rho_{т} g}{\frac{\pi}{\alpha}\rho_{в} r^{2} v_{в}} = \frac{4\alpha r \rho_{т} g}{3\rho_{в} v_{в}}. \quad (8)$$

Приняв ориентировочно скорость воздушного потока $v_{в} \approx 10$ м/с, плотность торфа $\rho_{т} \approx 500$ кг/м^3 [18, 19], $\alpha = \pi$, радиус частицы $r \approx 0{,}012\,5$ м [20, 21] и плотность воздуха $\rho_{в} \approx 1{,}205$ кг/м^3, подсчитаем скорость движения шарообразной частицы: $v_{ш} \geq \frac{4\pi \cdot 0{,}012\,5 \cdot 500 \cdot 9{,}81}{3 \cdot 1{,}205 \cdot 10} \approx 21{,}3$ м/с. Для появления силы Магнуса шарообразная частица, двигающаяся со скоростью $v_{ш}$, должна вращаться с частотой n:

$$n = \frac{v_{ш}}{2\pi r},$$

$n = \frac{21{,}3}{2\pi \cdot 0{,}012\,5} \approx 271$ об/с, что невозможно в реальных условиях. Следовательно, невозможно и появление силы Магнуса.

Природа подъемной силы, действующей на частицу, может быть вызвана образованием воздушных вихрей под и над частицей при ее обтекании потоком воздуха. При этом вихри подкидывают частицу с поверхности, заставляя ее оторваться от слоя и начать свое движение в потоке воздуха. Данный процесс весьма напоминает эффект ветровой эрозии почв [22, 23].

Рассмотрим взаимодействие воздушного потока с частицей. Для случая обтекания воздухом торфяной частицы, изображенной на рис. 3, запишем уравнение Д. Бернулли для плоскостей 1-1 и 2-2:

$$P_1 + \frac{\rho_в v_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho_в v_2^2}{2},$$

где P_1и P_2 – давление над и под частицей, Па; v_1 и v_2 – скорость воздушного потока над и под частицей, м/с.

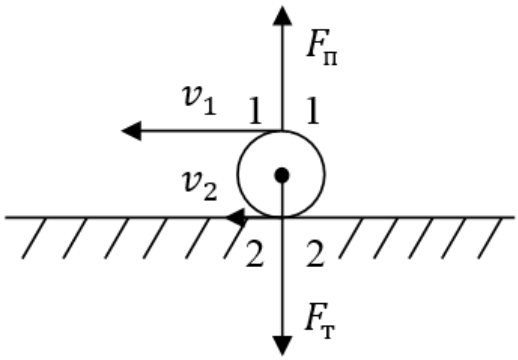


Рис. 3. Возникновение подъемной силы
при обтекании частицы потоком воздуха

Так как частица в неподвижном состоянии соприкасается с подстилающей поверхностью, то скорость воздушного потока под частицей $v_2 \approx 0$.Тогда разница давлений составит

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{\rho_в v_1^2}{2}.$$

Разница давлений вызывает появление подъемной силы, пропорциональной площади Миделя:

$$F_п = S_м \Delta P = S_м \frac{\rho_в v_1^2}{2}. \quad (9)$$

Для условия отрыва частицы от поверхности расстила должно выполняться условие: подъемная сила, определяемая по формуле(9), равна или превышает силу тяжести, которую находим из выражения (1):

$$\frac{F_п}{F_т} = \frac{3\rho_в v_1^2}{4r\rho_т g} \geq 1, \quad (10)$$

откуда скорость воздушного потока, необходимая для подъема частицы:

$$v_{\text{п}} = v_1 \geq \sqrt{\frac{4r\rho_{\text{т}}g}{3\rho_{\text{в}}}}. \quad (11)$$

Принимая значения величин, входящих в формулу (11), аналогичными к формуле (8), получим: $v_{\text{п}} \geq \sqrt{\frac{4 \cdot 0{,}012\,5 \cdot 500 \cdot 9{,}81}{3 \cdot 1{,}205}} \approx 8{,}2$ м/с. Вычисленное значение скорости воздушного потока хорошо согласуется с результатами экспериментов [24, 25], следовательно, природа подъемной силы заключена не во вращении частицы, а именно в разнице давлений над частицей и под ней.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Дифференциальное уравнение движения частицы в горизонтальной плоскости (на разгонном участке) будет иметь вид

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = m\frac{dv_{\text{ч}}}{dt} = F_x,$$

где $\frac{d^2x}{dt^2}$ – проекция ускорения частицы на ось *0X*; F_x – проекция результирующей силы на ось *0X* (см. рис. 1).

В вертикальной плоскости будем иметь уравнение

$$m\frac{d^2z}{dt^2} = F_z,$$

где $\frac{d^2z}{dt^2}$ – проекция ускорения частицы на ось *0Z*; F_z – проекция результирующей силы на ось *0Z*.

В горизонтальной плоскости перед страгиванием с места на частицу действуют лобовая сила, сила трения и сила сцепления:

$$F_x = F_{\text{л}} - F_{\text{тр}} - F_{\text{сц}}.$$

В вертикальной плоскости перед началом отрыва от подстилающей поверхности на частицу действует сила тяжести, подъемная сила и сила адгезии:

$$F_z = F_{\text{п}} - F_{\text{т}} - F_{\text{ад}}.$$

Однако при движении частицы в момент отрыва ее от поверхности расстила сила адгезии крайне мала, поэтому ею можно пренебречь.Тогда на частицу будут действовать подъемная сила и сила тяжести:

$$F_z = F_{\text{п}} - F_{\text{т}}.$$

Условия, по которым возможно страгивание частицы с места в горизонтальной плоскости на расстоянии, равном длине оси активной зоны всасывающего факела ($F_{\text{П}} \approx$

0), и ее отрыв от подстилающей поверхности при приближении к соплу будут иметь вид:

$$F_x = F_{\text{л}} - F_{\text{тр}} - F_{\text{сц}} > 0; \quad (12)$$

$$F_z = F_{\text{п}} - F_{\text{т}} > 0. \quad (13)$$

Решив уравнения (12) и (13) относительно лобовой и подъемной силы, получим:

$$F_{\text{л}} > F_{\text{тр}} + F_{\text{сц}}; \quad (14)$$

$$F_{\text{п}} > F_{\text{т}}. \quad (15)$$

Подставим в уравнения (14) и (15) выражения для соответствующих сил:
для ламинарного режима обтекания твердого тела

$$6\pi\nu\rho_{\text{в}} r(v_{x_{\text{л}}} - W) > f(\frac{4}{3}\pi r^3\rho_{\text{т}} g + \pi r\sigma) + cS_{\text{сц}}; \quad (16)$$

для турбулентного режима обтекания твердого тела:

$$c_{\text{л}}\frac{\rho_{\text{в}}}{2}S_{\text{м}}\left(v_{x_{\text{т}}} - W\right)^2 > f(\frac{4}{3}\pi r^3\rho_{\text{т}} g + \pi r\sigma) + cS_{\text{сц}}; \quad (17)$$

$$S_{\text{м}}\frac{\rho_{\text{в}}(v_{\text{п}} - W)^2}{2} > \frac{4}{3}\pi r^3\rho_{\text{т}} g. \quad (18)$$

Решим уравнения (16–18) относительно скорости воздушного потока:

$$v_{x_{\text{л}}} > \frac{f\left(\frac{4}{3}\pi r^3\rho_{\text{т}} g + \pi r\sigma\right) + cS_{\text{сц}}}{6\pi\nu\rho_{\text{в}} r} + W; \quad (19)$$

$$v_{x_{\text{т}}} > \sqrt{\frac{f\left(\frac{4}{3}\pi r^3\rho_{\text{т}} g + \pi r\sigma\right) + cS_{\text{сц}}}{c_{\text{л}}\frac{\rho_{\text{в}}}{2}S_{\text{м}}}} + W; \quad (20)$$

$$v_{\text{п}} > \sqrt{\frac{\frac{4}{3}\pi r^3\rho_{\text{т}} g}{S_{\text{м}}\frac{\rho_{\text{в}}}{2}}} + W = \sqrt{\frac{8\pi r^3\rho_{\text{т}} g}{3S_{\text{м}}\rho_{\text{в}}}} + W. \quad (21)$$

Уравнения (19) и (20) выражают теоретическую скорость воздушного потока, создаваемую всасывающим соплом в зоне нахождения частицы для страгивания ее с места и последующего разгона в горизонтальной плоскости при ламинарном и турбулентном режиме обтекания твердой частицы, а уравнение (21) – для начала отрыва частицы вверх от подстилающей поверхности. Из приведенных формул видно, что основными факторами, влияющими на создание скорости воздушного потока, необходимой для пневматической уборки, являются плотность и размеры торфяных частиц.

Проверка адекватности теоретической скорости воздушного потока, необходимой для страгивания торфяной шарообразной частицы с места, показала, что для условий эксперимента с опытными образцами фрезерной крошки из верхового и

переходного торфа ($r_{\text{верх}}$ = 0,011 475 м; $r_{\text{перех}}$ = 0,010 775 м; t = 20 °С; $\rho_{\text{в}}$ = 1,205 кг/м^3;$\rho_{\text{т верх}}$ = 518 кг/м^3; $\rho_{\text{т перех}}$ = 355 кг/м^3; $c_{\text{верх}}$ = 0,787 Н/м; $c_{\text{перех}}$ = 0,758 Н/м; $S_{\text{сц верх}}$ ≈ ≈ 0,000 827 м^2; $S_{\text{сц перех}}$ ≈ 0,000 729 м^2; $c_{\text{л}}$ = 0,5; $S_{\text{м верх}}$ = 0,000 413 м^2; $S_{\text{м перех}}$ = 0,000 365 м^2; α = 30–35°; W = 0 [26, 27]) выражение (20) требует уточнения. Ввиду того, что силы
сцепления и адгезии на порядок меньше, чем сила тяжести, в ориентировочных расчетах их можно не учитывать. Тогда

$$v_{x_{\text{т}}} > K\sqrt{\frac{\frac{4}{3}f\pi r^3\rho_{\text{т}}g}{c_{\text{л}}\frac{\rho_{\text{в}}}{2}S_{\text{м}}}} + W,$$

где K – уточняющий коэффициент, зависящий от вида торфа, угла установки всасывающего сопла, высоты расположения сопла над подстилающей поверхностью и др.; для верхового торфа K = 0,47, для переходного K = 0,42.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного исследованияможно сделать следующие выводы.

1. Определены силы, действующие на частицу торфа в активной зоне всасывающего факела. Отмечено, что турбулентный поток воздуха создает силу лобового давления на три порядка большую, чем ламинарный.

2. Установлено, что причиной отрыва торфяной частицы от подстилающей поверхности является не сила Магнуса, вызванная вращением частицы, а подъемная сила, вызванная разницей давлений над и под частицей.

3. Разработаны математические модели, позволяющие теоретически определить минимальную скорость воздушного потока, необходимую для страгивания частицы с места и отрыва от подстилающей поверхности торфяной залежи. Отмечено, что плотность торфяных частиц и их габаритные размеры являются определяющими при оценке необходимой скорости воздушного потока.

4. Установлено, что силы адгезии и сцепления, будучи ничтожно малыми, не оказывают сколько-нибудь значительного влияния на страгивание частицы с места и ее отрыв от подстилающей поверхности и поэтому при разработке математических моделей скорости воздушного потока могут не учитываться.

5. Уточнена скорость воздушного турбулентного потока, необходимая для страгивания торфяной частицы с места.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соболев А.А., Мельник П.А., Тютюнник А.О. Движение частиц в воздушном потоке // *Вектор науки ТГУ*. 2011. № 3 (17). С. 82–86.

2. Солопов С.Г., Горцакалян С.Г., Чернышев В.В. Определение минимальной скорости воздушного потока на входе во всасывающее сопло пневмоуборочной машины // *Механизация добычи торфа: сборник научных трудов.* М.: Недра, 1974. Вып. XVII (XIII). С. 5–9.

3. Чернышев В.В., Горцакалян Л.О., Ворзонин В.А. Исследование механизма взвешивания торфяной фрезерной крошки с залежи во всасывающем факеле сопла пневмоуборочной машины // *Механизация добычи торфа: сборник научных трудов.* М.: Недра, 1974. Вып. XVII (XIII). С. 17–21.

4. Викторов М.С., Маринин О.О., Смык А.Ф. Применение эффекта Магнуса в инфраструктуре дороги // *Автомобиль, дорога, инфраструктура*. 2019. № 1 (19). С. 23–31.

5. Керученко Л.С., Мальцева Е.И. Механизм осаждения частиц загрязнений в капиллярных каналах // *Инновационные технологии в машиностроении*: сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции. Томск: ТПУ, 2017. С. 288–293. URL: http://earchive.tpu.ru/handle/11683/45708 (дата обращения: 06.11.2021).

6. Полюшкин Н.Г. Основы теории трения, износа, смазки. Красноярск: КГАУ, 2013. 192 с.

7. Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. М.: Наука, 1977. 280 с.

8. Лазарев А.В. [и др.]. Справочник по торфу.М.: Недра, 1982. 760 с.

9. Самсонов Л.Н. Фрезерование торфяной залежи. М.: Недра, 1985. 211 с.

10. Амарян Л.С. Прочность и деформируемость торфяных грунтов. М.: Недра, 1969. 192 с.

11. Горфин О.С., Фомин К.В. Конвейерный транспорт. Тверь: ТГТУ, 2008. 114 с.

12. Слепков А.И. Механика. Лекции. URL: http://genphys.phys.msu.ru/slepkov/glava_9-int.pdf (дата обращения: 15.02.2022).

13. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами. М.: Мир, 1975. 380 с.

14.Коэффициент лобового сопротивления для шара. URL:https://yandex.ru/images/search?text=коэффициент%20лобового%20сопротивления%20для%20шара&stype=image&lr=14&source=wiz&pos=5&img_url=https%3A%2F%2Fi5.rae.ru%2Fupfs%2Fi%2F2011%2F06%2Fimage118.jpg&rpt=simage (дата обращения: 06.11.2021).

15. Адельсон С.В. Процессы и аппараты нефтепереработки и нефтехимии. М.: Гостоптехиздат, 1963. 311 с.

16. Физические свойства воздуха. URL: http://thermalinfo.ru/svojstva-gazov/gazovye-smesi/fizicheskie-svojstva-vozduha-plotnost-vyazkost-teploemkost-entropiya(дата обращения: 15.02.2022).

17. Прандтль Л. Эффект Магнуса и ветряной корабль // *Успехи физических наук*. 1925. Т. 5. Вып. 1–2. С. 1–27.

18. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Исследование аэродинамических параметров фрезерного торфа, добываемого ООО «Пиндструп» // *Труды ИнсТорфа*. 2020. № 22 (75). С. 32–38.

19. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Обоснование параметров мундштука для всасывающего сопла торфяной пневмоуборочной машины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 1 (13). С. 45–56.

20. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Исследование работы всасывающего сопла торфяной пневмоуборочной машины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 3 (7). С. 40–49.

21. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Зависимость фактической длины оси всасывающего факела от угла установки сопла торфяной пневмоуборочной машины // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021.№ 11 (113). Ч. 1. С. 79–85.

22. Гендугов В.М., Глазунов Г.П. Ветровая эрозия почвы и запыления воздуха. М.: Физматлит. 2007. 240 с.

23. Эффект Магнуса. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Эффект_Магнуса (дата обращения: 06.11.2021).

24. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Обоснование параметров установки сопла торфяной пневмоуборочной машины над подстилающей поверхностью залежи // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Техническиенауки»*. 2021. № 4 (12). С. 38–45.

25. Yablonev A., Scherbakova D. Evaluation of KTT-2 Pneumatic Peat Harvesting Machine's Nozzle Suction Capacity//*E3S Web of Conferences.*2020. V. 174.URL: https://ar.booksc.org/book/83727504/1e6e2a (датаобращения: 19.12.2021).

26. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Исследование и определение рациональных параметров установки всасывающего сопла пневматической торфоуборочной машины // *Горное оборудование и электромеханика*. 2022. № 2. С. 14–22.

27. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Обоснование параметров установки всасывающего сопла торфяной пневмоуборочной машины // *Горный журнал*. 2022. № 5. С. 57–62.

Для цитирования: Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Анализ сил, действующих на частицу фрезерного торфа в зоне всасывающего факела пневмоуборочной машины // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Техническиенауки». 2022. № 3 (15). С. 48–60.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.5.08

МУЛЬТИПЕЛЛИСТОРНЫЙ ТЕРМОХИМИЧЕСКИЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ ГАЗОВОЙ ХРОМАТОГРАФИИ

Л.В. ИЛЯСОВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина,22, e-mail: lvi450714@mail.ru

© Илясов Л.В., 2022

Приводятся результаты разработок нового термохимического детектора горючих веществ, названного мультипеллисторным термохимическим детектором (МПТХД) и реализованного на базе термохимических чувствительных элементов типа ТТЧЭ-2. Детектор содержит пакет из четырех измерительных и четырех сравнительных чувствительных пеллисторных элементов, установленных таким образом, что их держатели создают проточную камеру, на оси которой размещены пеллисторы. Экспериментальным путем установлено, что для практически полного сгорания метана, который является наиболее стойким к каталитическому окислению газом, достаточно использовать четыре измерительных и четыре сравнительных чувствительных элемента. Приведена математическая модель сигнала детектора и описана процедура получения количественной информации на основе этой модели. Экспериментальным путем показана возможностьиспользования МПТХД в газовом хроматографе при его работе на воздухе и гелии в качестве газа-носителя. Установлена возможность использования МПТХД в составе анализаторов низшей объемной удельной теплоты сгорания смесей углеводородных газов, а также в самокалибрующихся хроматографах.

Ключевые слова:термохимический детектор, мультипеллисторный, хроматограф, горючие газы и пары.

ВВЕДЕНИЕ

Хроматографический анализ в настоящее время является основным средством получения количественной информации о составе многокомпонентныхсред. Как в лабораторных, так и в потоковых автоматических хроматографах наиболее распространенным детектором является термокондуктометрический газовый детектор (детектор по теплопроводности). Высокая стабильность и средняя чувствительность термокондуктометрического детектора обеспечивается при его работе на газе-носителе гелии. Причем для получения количественной информации используются сведения о коэффициентах относительной чувствительности, полученные для различных газов и паров экспериментально. Для большинства веществ эти коэффициенты неизвестны, поэтому для получения количественной информации о составе многокомпонентной смеси применяется абсолютная калибровка хроматографа, которая требует использования чистых веществ и проведения сложных объемных измерений [1–4]. Относительно просто решается задача количественного газохроматографического анализа при использовании детекторов плотности газов [5, 6] и равночувствительных

детекторов [7, 8], так как у первых сигнал связан с разностью плотностей детектируемых веществ и газа-носителя, а у вторых –с объемной концентрацией компонента в газе-носителе и не зависит от природы последнего.Равночувствительные детекторы хотя и обеспечивают возможность работына гелии, но при этом имеют низкуючувствительность, а известные детекторы плотности при работе на этом же газе-носителе также имеют очень низкую чувствительность.

Указанные факторы определяют целесообразность разработки простого детектора, способного работать на гелии, сигнал которого связан с плотностью детектируемых компонентов и который обладает чувствительностью, близкой к чувствительности термокондуктометрического детектора, работающего на гелии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Из современного арсенала газовых детекторов близким по простоте конструкции к термокондуктометрическому детектору является термохимический детектор, сигнал *U* которого описывается выражением [9]:

$$U = k \cdot \Psi \cdot Q^{\text{н}} \cdot \alpha, \quad (1)$$

где*k* – постоянный коэффициент, зависящий от режимных параметров и характеристик детектирующего устройства; Ψ – постоянный коэффициент, зависящий от природы детектируемого компонента;$Q^{\text{Н}}$ – низшая объемная удельная теплота сгорания детектируемого компонента в газовой фазе; α– объемная концентрация детектируемого компонента в газе-носителе.

Такие детекторы обладают на порядок большей чувствительностью по сравнению с термокондуктометрическими и применяются в основном в хроматографах, использующих в качестве газа-носителявоздух [10].

Сигнал МПТХД с достаточной для многих случаев точностью связан с плотностью детектируемых горючих веществ[11, 12]. Прибор способен работать при использовании в качестве газа-носителя воздуха или гелия.

Работа детектора основана на зависимости теплового эффекта каталитического окисления углеводородов от плотности последних в газовой фазе. Эта зависимость использована в работе [13] для измерения плотности смесей предельных углеводородов в природных газах с помощью одного пеллисторного термохимического детектора. Относительная погрешность такого измерения может составлять ±6 %. Такое высокое значение погрешности, по-видимому,связано с тем фактом, что степени окисления различных углеводородов при постоянной температуре пеллисторов существенно различаются, о чем свидетельствует наличиекоэффициента Ψ в математической модели сигнала термохимического пеллисторного детектора. Основным отличием МПТХД, описанного в работе [11], от известных термохимических детекторов является то, что в этом детекторе обеспечивается практически полное окисление любых горючих веществ, а это означает, что коэффициент Ψ в выражении (1) для всех горючих веществ равен единице. При таком условии для сигнала МПТХД справедливо выражение

$$U = k \cdot Q^{\text{Н}} \cdot \alpha, \quad (2)$$

т.е. сигнал детектора определяется низшей объемной удельной теплотой сгорания вещества независимо от его природы. Технически это условие можно реализовать путем размещения проточной камеры детектора такого количества пеллисторов, при котором будет обеспечиваться практически полное сгорание горючих веществ.

Для определения степени сгорания горючих веществ была создана установка (рис.1), в которой использовались пеллисторные чувствительные элементы типа ТТЧЭ-2 (рис. 2). Эти элементы имеют удобную конструкцию, а именно: как измерительные, так и сравнительные пеллисторы размещены между электродами, установленными на изготовленном из изоляционного материала кольцевом держателе,что позволяет использовать пакеты из нескольких пеллисторов. При этом кольцеобразные держатели пеллисторов образуют проточную камеру, как показано на рис. 1.

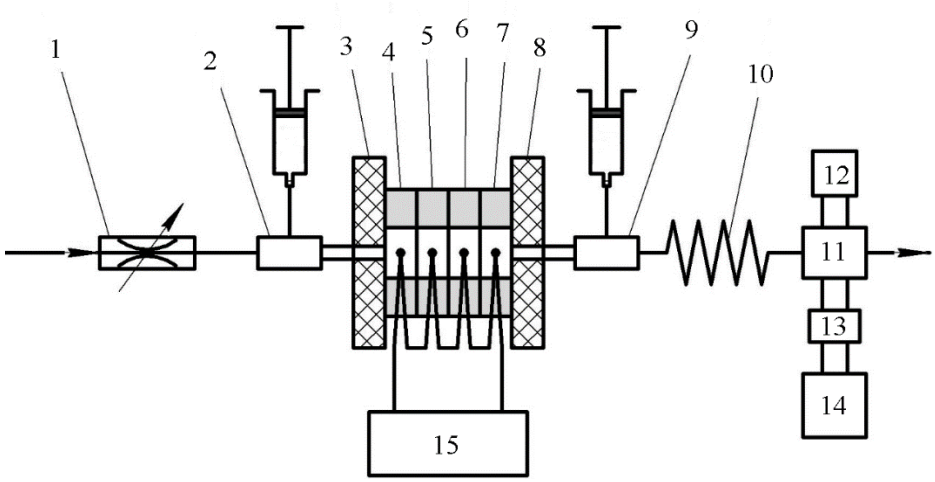


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – переменный дроссель; 2 и 9 – устройства для ввода проб газа; 3 и 8 – фланцы; 4–7 –пеллисторные чувствительные элементы типа ТТЧЭ 2; 10 – колонка; 11 – термохимический детектор; 12 – источник питания термохимического детектора; 13 – делитель напряжения; 14 – электронный потенциометр; 15 – стабилизированный источник постоянного тока

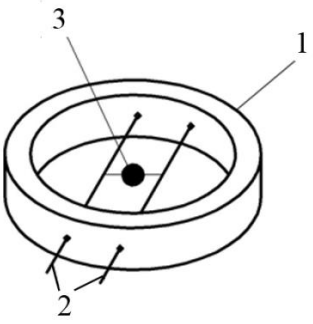


Рис. 2. Конструкцияпеллисторного чувствительного элемента: 1 – кольцеобразный изоляционный держатель; 2 – электроды; 3 – пеллистор

Экспериментальная установка включала в себя источник воздуха постоянного давления; последовательно включенное по потоку воздуха устройство ввода пробы горючего газа, представляющее собой отрезок резиновой трубки; пакет измерительных пеллисторов, размещенных между фланцами; второе устройство ввода пробы горючего газа; колонку в виде трубки из нержавеющей стали внутренним диаметром 3 мм и длиной 600 мм; термохимический детектор с источником стабилизированного питания; делитель сигнала детектора и электронный автоматический потенциометр. Для нагревания пеллисторов использовался стабилизированный источник питания типа Б5-47.

Исследования осуществлялись следующим образом. К источнику питания подключались один,два,три или четырепеллистора. С помощью переменного дросселя устанавливался расход воздуха 1,5–3,0 л/ч, а с помощью стабилизированного источника питания устанавливалось максимально допустимое для пеллисторовТТЧЭ-2 значение тока, равное 165 мА.Через первое устройство ввода микрошприцем вводились пробы анализируемого газа, равные 1,3 и 5 мкл. В качестве анализируемого газа использовался метан, который имеет максимальную стойкость к каталитическому окислению. Проба газа потоком воздуха транспортировалась через проточную камеру с пеллисторами, где происходило ее частичное каталитическое сгорание на поверхности пеллистора, второе устройство ввода пробы и колонку, после чего остатки горючего газа поступали в термохимический детектор, импульсный сигнал которого регистрировался на диаграммной ленте потенциометра. Для определения степени сгорания в каждом опыте такая же по объему проба вводилась во второе устройство ввода. Сигнал термохимического детектора, вызванный этой пробой газа, также регистрировался на диаграммной ленте потенциометра. После завершения этих опытов измерялись амплитуды U_1 и U_2двух импульсных сигналов.Степень сгорания метанана пеллисторе(пеллисторах)определялась из выражения

$$\Psi = \frac{U_2 - U_1}{U_2}. \quad (3)$$

На графике (рис. 3) показана зависимость степени сгорания метана от числа установленных последовательно пеллисторных чувствительных элементов при следующих условиях:

расход газа-носителя (воздух) 2л/ч;

объем пробы метана 5 мкл;

ток пеллисторов 165 мА.

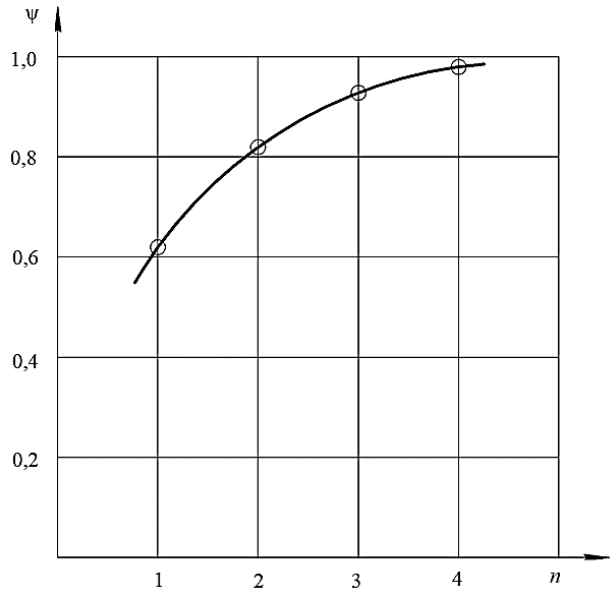


Рис. 3. Зависимость степени сгорания метана от числа пеллисторов

Как видно из рис. 3, при использовании четырех пеллисторных чувствительных элементов степень сгорания метана составляет 0,98, т.е. близка к единице.

Аналогичные результаты были получены при всех приведенных выше значениях расхода газа-носителя и объемах пробы метана.

Результаты исследований были использованы при разработке МПТХД, схема которого показана на рис. 4.

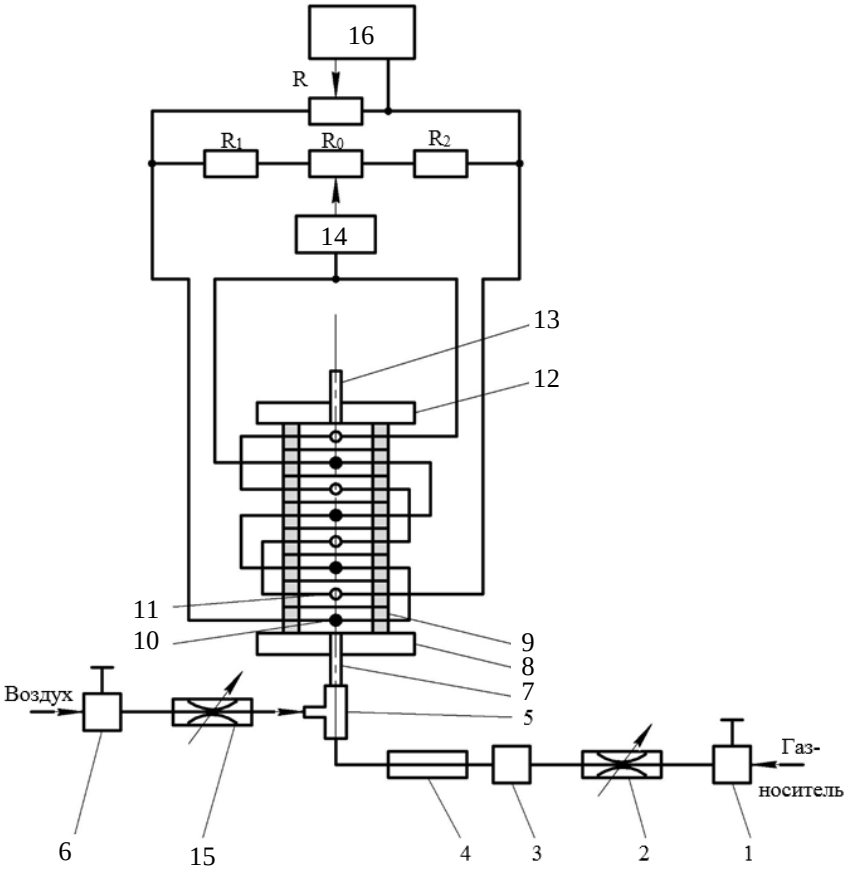


Рис. 4. Схема мультипеллисторного детектора: 1 – стабилизатор расхода гелия; 2 и 15 – переменные дроссели; 3 – устройство ввода пробы газа; 4 – колонка; 5 – тройник; 6 – стабилизатор давления воздуха; 7– входной штуцер; 8 и 12 – крышки; 9 – кольцеобразные держатели пеллисторов; 10 – измерительные пеллисторы; 11 – сравнительные пеллисторы; 13– выходной штуцер; 14 – стабилизированный источник электропитания неравновесного моста; 16– электронный потенциометр; R_1 иR_2–постоянные резисторы сопротивлением 100 Ом; R_0– переменный резистор сопротивлением 20 Ом

Детектор содержит пакет из восьми чувствительных элементов типа ТТЧЭ-2, размещенныхмежду двумя крышками,причем измерительные и сравнительные пеллисторы чередуются друг с другом и располагаются вдоль оси проточной камеры, образованной кольцеобразными держателями пеллисторов. При этом первым по потоку размещался измерительный пеллистор (на рис. 4 черными кружочками изображены измерительные, а белыми – сравнительные пеллисторы). Измерительные и сравнительные пеллисторы соединялись последовательно и включались в смежные плечи неуравновешенного электрического моста, в который также включались два постоянных резистора сопротивлением по 100 Ом и один переменный резистор сопротивлением 20 Ом, служащий для балансировки неуравновешенного моста.

Последний получал питание от стабилизированного источника постоянного тока типа Б5-47, что обеспечивало протекание через пеллисторы постоянного тока, равного 165 мА. Во входной штуцер детектора через тройник подавались в два потока газы, а именно: воздух через стабилизатор давления и газ-носитель (воздух или гелий) через переменный дроссель. После установки начального уровня сигнала детектора с помощью переменного резистораR_0 в поток газа-носителя вводились пробы, объем которых составлял 1, 3 и 5 мкл.

Далее пробы транспортировались потоком газа-носителя через тройник в проточную камеру детектора. При сгорании метананаизмерительных пеллисторах их температура увеличивалась, следовательно, увеличивалось и их суммарное электрическое сопротивление. При этом суммарное электрическое сопротивление сравнительных пеллисторов, которые, как и в обычных термохимических детекторах, служат для исключения влияния на результат измерения температуры анализируемого газа, не изменялось. Это вызывало разбаланс неуравновешенного моста, который после масштабирования на делителе напряжения измерялся и регистрировался автоматическим потенциометром. Возникающий импульсный сигнал имел форму, близкую к кривой Гаусса. Для интерпретации измерительной информации, получаемой с помощью МПТХД, была использована зависимость между низшей объемной удельной теплоты сгорания и плотностью газов и паров многих углеводородов. Расчеты, выполненные с использованием справочных данных о низшей объемной удельнойтеплоте сгорания парафиновых углеводородовначиная от C_1 до C_8 и олефиновых углеводородов от C_2 до C_5, позволили представить эту зависимость в виде

$$Q_i^{\text{Н}} = K_0 \cdot \rho_i, \qquad (4)$$

где $Q_i^{\text{Н}}$– объемная низшая удельная теплота сгорания i-го компонента;ρ_i– плотность i-го компонента в нормальных условиях;K_0– постоянный коэффициент, равный 45,5–45,8 кДж/кг.

По существу, коэффициент K_0 представляет собой удельную массовую низшую теплоту сгорания названных углеводородов. С учетом выражения (4) выражение (2) можно представить в виде

$$U = K_0 \cdot k \cdot \rho \cdot \alpha. \qquad (5)$$

Объемная концентрация детектируемого вещества в потоке газа-носителя описывается выражением

$$\alpha = \frac{q_i}{q_{\text{г–н}}}, \qquad (6)$$

гдеq_i– парциальный объемный расход i-го компонента в потоке газа-носителя;$q_{\text{г-н}}$– объемный расход газа-носителя.

Площадь импульсного сигнала детектора в этом случае описывается выражением

$$S = \int_{\tau_1}^{\tau_2} U d\tau = \int_{\tau_1}^{\tau_2} k \cdot K_0 \cdot \rho_i \frac{q_i}{q_{\text{г–н}}} \cdot \alpha d\tau = K \cdot m_i, \qquad (7)$$

где$K = \frac{k \cdot K_0}{q_{г-н}}$– постоянный для принятых условий анализа коэффициент; $m_i = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \rho_i \cdot q_i \cdot d\tau$ – масса *i*-го детектируемого компонента; τ_2иτ_1 – моменты начала и окончания выхода *i*-го детектируемого компонента в детектор.

Из выражения (7) следует, что площадь импульсного сигнала пропорциональна массе *i*-го детектируемого компонента. Выражение (7) позволяет осуществлять расчет хроматограммы.Массовая дольная концентрация*i*-го компонента может быть определена по формуле

$$C_i^m = \frac{S_i}{\sum_{i=1}^{n} S_i} = \frac{K \cdot m_i}{\sum_{i=1}^{n} K \cdot m_i} = \frac{m_i}{M}, \quad (8)$$

где*M*– масса пробы анализируемой среды.

Для расчета хроматограмм при использовании МПТХД не требуется дополнительной информации о каких-либо поправочных коэффициентах.

Мультипеллисторный термохимический детектор был использован для анализа многокомпонентных смесей углеводородов, а именно пирогаза и природного газа, состав которых определялся с помощью хроматографа. Расхождение между измеренными концентрациями компонентов составило ±2–3 %. В этих опытах в качестве газа-носителя использовался осушенный воздух.

Наибольший интерес представляет возможность практического применения МПТХД при использовании в качестве газа-носителя гелия, так как последний в настоящее время чаще всего применяется в лабораторныхи промышленных хроматографах. Проведенные предварительные исследования показали, что МПТХД сохраняет работоспособность при работе на гелии в том случае, когда расход воздуха, подаваемого в детектор, превосходит расход гелия не менее чем в пять раз. Полученные при таких условиях хроматограммы многокомпонентных газовых сред свидетельствуют о том, что зависимость (7), описывающая сигнал МПТХД, сохраняется при использовании в качестве газа-носителя гелия.

Из всего вышесказанного следует, что предложенное устройство позволяет в процессе хроматографического анализа получать информацию о массе детектируемых углеводородных компонентов и вычислять по хроматограмме массовую концентрацию веществ без каких-либо поправочных коэффициентов. Он может также использоваться для измерения низшей объемной удельной теплоты сгорания смесей углеводородных газов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенныев статье результаты следует рассматривать как предварительные. Необходимо провести исследование работы МПТХД на газе-носителе гелии в составе лабораторных и промышленных хроматографов, изучить возможность его использования в составе анализаторов низшей объемной удельной теплоты сгорания газов (т.е. в качестве калориметра), а также в самокалибрующихся газовых хроматографах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по газовой хроматографии: в 2 ч. / под ред. Э. Лейбница, Х.Г. Штруппе. М.: Мир, 1988. Ч. 1.480 с.

2. Беккер Ю.Хроматография. Инструментальная аналитика: методы хроматографии и капиллярного электрофореза. М.: Техносфера, 2009.470 с.

3.Сажин С.Г. Приборы контроля состава и качества технологических сред: учебное пособие. СПб.: Лань, 2012.431 с.

4. Грушка Э., Йенсен Э., Хатиб С.[и др.].Количественный анализ хроматографическим методом. М.: Мир,1990. 319 с.

5. Бражников В.В. Детекторы для хроматографии. М.: Машиностроение, 1992. 320 с.

6. Юнес Т. Волноводные акустические детекторы газов и паров. Дисс… канд. техн. наук.Москва. 2003. 157 с.

7. Фарзане Н.Г., Илясов Л.В., Азим-заде А.Ю. Автоматические детекторы газов и жидкостей. М.: Энергоатомиздат, 1983. 96 с.

8. Варламов А.П. Диффузионные равночувствительные детекторы газов и паров. Дисс… канд. техн. наук. Москва. 2004. 166 с.

9. Фарзане Н.Г., Илясов Л.В., Азим-заде А.Ю. Технологические измерения и приборы. М.:Высш.школа, 1989. 455 с.

10. Авдеева А.А., Белосельский Б.С., Краснов М.Н. Контроль топлива на электростанциях. М.: Энергия, 1973. 384 с.

11. Патент РФ 184021. *Термохимический детектор газов* / Давыденков А.К., Илясов Л.В.; Заявл. 31.08.2018. Опубл. 11.10.2018, Бюл. № 29.

12. Илясов Л.В.Интерпретация измерительной информации, получаемой от самокалибрующихся газовых хроматографов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 1 (5). С. 63–74.

13. Тарасевич В.Н. Металлические терморезистивныепреобразователи горючих газов. Киев: Наукова думка, 1988. 282 с.

Для цитирования: Илясов Л.В. Мультипеллисторный термохимический детектор для газовой хроматографии // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Техническиенауки». 2022. № 3 (15). С. 61–68.

УДК 004.021

АЛГОРИТМ ФРОНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СИСТЕМЕ АНАЛИЗА И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ

Ю.Н. МАТВЕЕВ, д-р техн. наук, Л.О. ЧЕРНЫШЕВ, аспирант

Тверской государственный технический университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: plumber63@mail.ru

© Матвеев Ю.Н., Чернышев Л.О., 2022

Рассмотрен фронтальный подход к построению клеточной модели для оперативного реагирования на локальные выбросы аварийно-опасных химических веществ в атмосферу. Кратко описан алгоритм фронтального моделирования на основе гексагонального шаблона двумерной сетки и предложены решения по обеспечению стабильности результата прогноза. В целевой функции поиска решения применена

максиминная свертка частных критериев. Рассмотрены примеры оценки параметров модели на основе решений уравнения Гаусса, а также данных полевых наблюдений. Приведены графики временных затрат на поиск решения при изменении уровня детализации зоны загрязнения.

Ключевые слова: оперативное реагирование, ассимиляция данных, фронтальный алгоритм, клеточная модель, быстродействие.

ВВЕДЕНИЕ

Современные подходы [1] к обоснованию мероприятий при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций связаны с разработкой автоматизированных систем принятия решений, предоставляющих оператору супервизорные оценки масштаба и степени заражения местности при выбросах вредных веществ. В функционале таких систем должна быть предусмотрена возможность корректировки параметров прогнозной модели по данным оперативного мониторинга состояния прилегающей территории, основанная на «усвоении» или ассимиляции результатов полевых наблюдений.

Процедура определения параметров модели, при которых достигается минимальное координатное отклонение от воспроизводимой изолинии до точки замера концентрации, связана с обработкой результатов целой серии имитационных экспериментов и способна привести к существенным временным затратам на формирование оценочных данных о размерах зоны поражения, а также снизить эффективность оперативного реагирования. В связи с этимвесьма актуальна задача повышения скорости модельных вычислений в системе визуализации и анализа последствий выбросов с возможностью ассимиляции фактических данных химического заражения местности.

К основным способам увеличения быстродействия автоматизированных систем принятия решений следует отнести внедрение скоростных алгоритмов моделирования области выброса в вычислительное ядро системы, а также разделение моделируемой среды на потоки с обеспечением параллельных вычислений в схеме обработки информации.

В работе [2] кратко описаны свойства наиболее известных классов моделей распространения примесей при ограниченном масштабе загрязнения. Показано, что аналитические модели Гаусса не учитывают эффекты взаимодействия выброса с препятствиями. Вычислительные модели гидроаэродинамики (CFD-модели) требуют привлечения значительных вычислительных ресурсов, что может существенно снизить быстродействие автоматизированных систем принятия решений. Авторами предложена эффективная модель распространения примеси, основанная на клеточно-автоматном подходе [3] к симуляции полета частиц с учетом правил обхода препятствий.

Клеточная модель демонстрирует устойчивые результаты при ограниченном количестве результирующих секторов, формирующих санитарную защитную зону. Поскольку повышение уровня детализации зоны загрязнения приводило к существенному росту затрат процессорного времени на обработку информации в условиях сложной конфигурации преград, в схеме обработки данных наблюдений [4] были использованы алгоритмы «грубого» приближения к опорному решению.

Глобальные алгоритмы поиска [5] диктуют жесткие требования к скорости модельных вычислений, выполнение которых сложно обеспечить при значительных затратах вычислительных ресурсов ЭВМ на симуляцию «блуждания» частиц по карте с контурами препятствий (особенно в случае большого разброса параметров модели).

Анализ эмпирических допущений показал, что проблема быстродействия клеточной модели может быть разрешена при фронтальном описании облака выброса. В модифицированном подходе зона загрязнения на цифровой карте местности представлена фронтом концентрации примеси, который в ходе выброса достигает и охватывает преграды, с сохранением условий, формирующих эллипс рассеивания, а также гипотезы о нормальности закона распределения, задающего угловое направление фронтального расширения.Фронтальный подход позволил в значительной степени ускорить модельные вычисления и снизить затраты процессорного времени при расчете зоны загрязнения в случае сложной конфигурации преград. Основными недостатками фронтального подхода являются некоторое снижение стабильности результатов моделирования и ограничение возможности симуляции пристеночного ветра.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Описание фронтального алгоритма. Для воспроизведения фронта облака на основе прямого перебора всех ячеек двумерной расчетной сетки необходимы значительные вычислительные мощности, поэтому авторами предложен альтернативный способ вычислений, основанный на последовательной обработке множества возможных направлений перехода частиц или списков направлений. Область выброса представлена множеством Ω квадратных клеток поверхности, структура которого охватывает внутренние клетки среды, а также клетки источника, границ и препятствий. Каждая клетка характеризуется парой $(u, x) \in A \times M$, где $u \in A = \{0, 1\}$ – булев индикатор присутствия примеси; $x \in X$ – индекс имени, задающий место расположения клетки на множестве имен $X = \{(i, j): i, j = 1,...,N\}$. Множеству ячеек Ω ставится в соответствие массив состояния клеток $U = \{u(i, j): i, j = 1,...,N\}$, состоящий из пустых U_1 и заполненных клеток U_2: $U = U_1 \cup U_2$.

Центральная клетка с окрестностью фон Неймана имеет шаблон соседства $T(i, j) = \{(i, j), (i, j+1), (i+1, j), (i, j-1), (i-1, j)\}$ с локальной конфигурацией $S(i, j) = \{u_0(i, j), u_1(i, j+1), u_2(i+1, j), u_3(i, j-1), u_4(i-1, j)\}$, которая охватывает окрестность из пяти ячеек и формирует четыре направления углового перехода частицы для каждого имени $x \in M$.

Таким образом, мощность nm множества $PL = \{p_1, p_2, \ldots, p_{nm}\}$ направлений перехода зависит от количества ячеек, взаимодействующих в шаблоне соседства центральной клетки. Для формирования списка направлений $P = (X, r)$ использован «указатель» r, характеризующий угловое направление перехода: $r = k/nm$, где k – индекс перехода.

Фронтальный алгоритм основан на клеточно-автоматном подходе, поэтому величина nm зависит от шаблона соседства центральной ячейки [6, 7]. Например, окрестности фон Неймана соответствует число $nm = 4$, окрестности Мура $nm = 8$. Анализ показал, что при малых величинах дисперсии рассеивания фронтальные алгоритмы на основе окрестности фонНеймана приводят к искажению формы облака. В алгоритмах с окрестностью Мура необходимо разрешить проблему неравных расстояний в шаблоне соседства. Поэтому в дальнейших расчетах использован гексагональный шаблон двумерной сетки с числом $nm = 6$ и угловым интервалом $\Delta\varphi = 60°$ (рис.1).

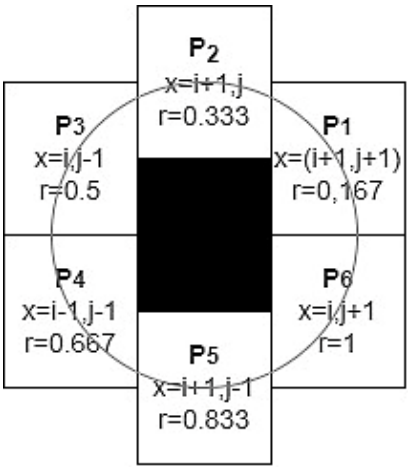


Рис. 1. Списки направлений *PL* в гексагональном шаблоне (*nm* = 6)

Рассмотрим обобщенную схему работы фронтального алгоритма (рис. 2):

1. Формирование списка направлений (переходов). Для построения исходного списка *PS*использовано расчетное соотношение

$$PS = \{(X, r) \in PL \mid r = \frac{\lfloor normDistrVal * nm \rfloor + 1}{nm}\}, \quad (1)$$

где*normDistrVal*– случайное число нормального закона распределения, задающее угловое направление перехода.

2. Выбор элемента списка. Процедура поиска индекса (ссылки) заполняемой ячейки в массиве элементов списка реализованана основе генератора случайных чисел, равномерно распределенных в единичном интервале.

3. Заполнение ячейки. Изменение состояния (переход) результирующей ячейки с последующим расширением области выброса.

4. Расширение и корректировка списка направлений. После заполнения ячейки в списки по направлениям гексагонального шаблона добавляются новые ссылки на соседние ячейки. Исключение составляют ячейки окрестности, которые были заполнены ранее или соответствуют преградам.

Поскольку функционирование алгоритма невозможно без регулярной «очистки» списка направлений от ссылок на заполненные ячейки, в схеме обработки реализован функционал счетчика «подряд сделанных промахов». При обнаружении двух и более промахов алгоритма в схеме обработки предусмотрен вызов процедур поиска и удаления таких ссылок из массива элементов списка. Для повышения стабильности результатов фронтального моделирования могут быть использованы следующие решения:

увеличение размерности серии экспериментов, составляющих одну глобальную итерацию;

представление результатов моделирования в виде «семейства» изолиний, основанного на обработке ограниченного массива расчетных ячеек (число ячеек, формирующих каждую изолинию концентрации, зависит от выраженной в секторах площади опасной зоны загрязнения);

повышение уровня детализации (разрешения) карты и, следовательно, увеличение количества ячеек в облаке.

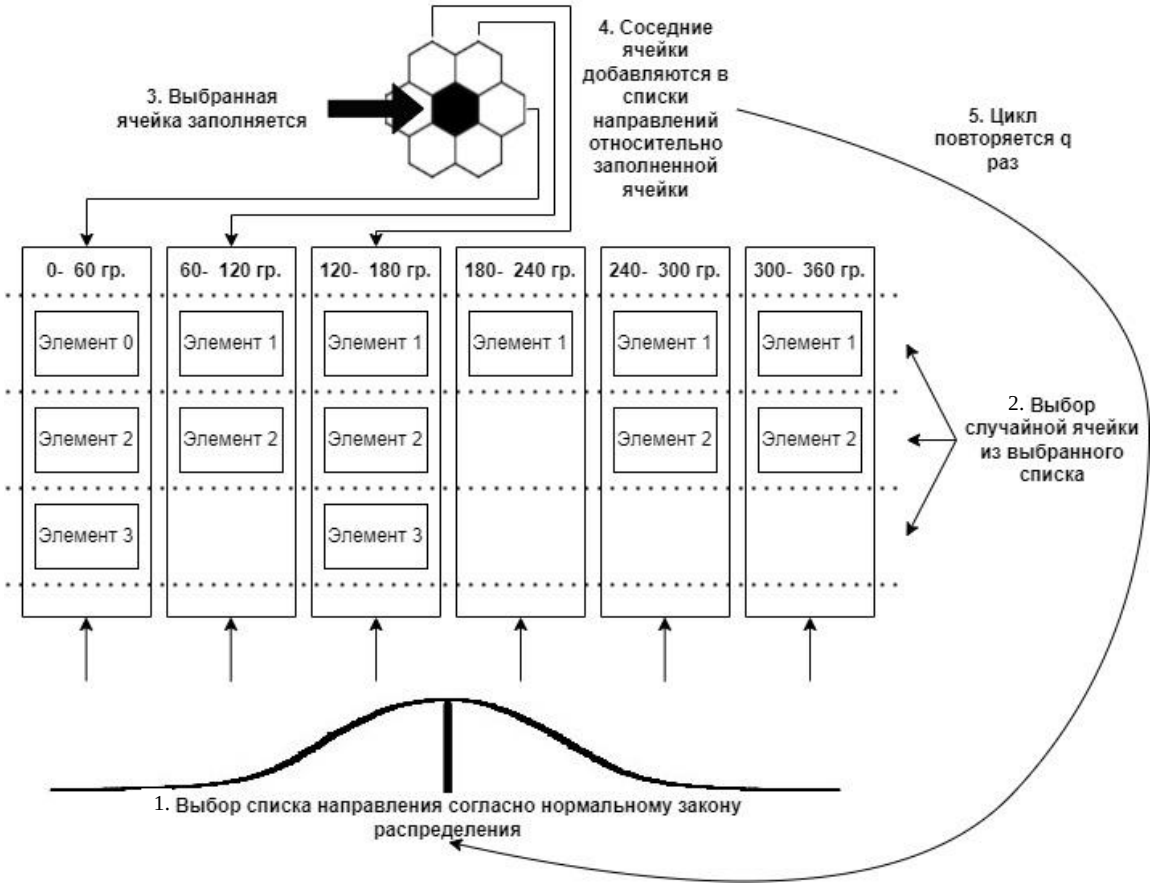
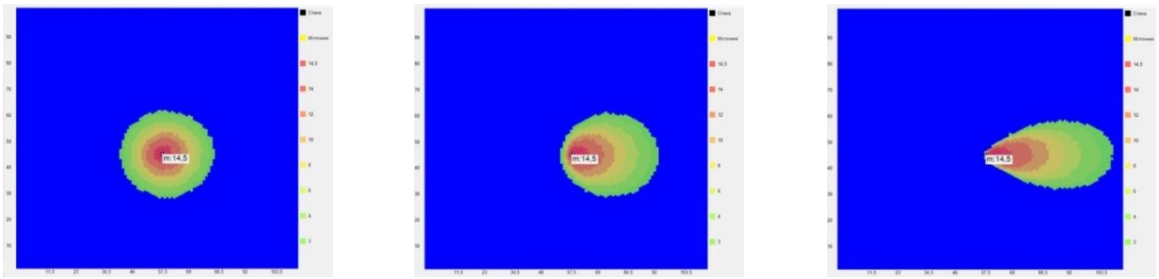


Рис. 2. Обобщенная схема фронтального алгоритма

На рис. 3 приведены примеры воспроизведения изолиний концентрации с использованием разработанного алгоритма. Результаты моделирования демонстрируют работоспособность алгоритма при больших разбросах углового направления перехода частиц.



(а) (б) (в)

Рис. 3. Результаты фронтального моделирования выброса, где σ^* – стандартное отклонение при нормальном распределении частиц по угловым направлениям перехода (для 1 000 прогонов модели): σ^* = 130°(а); σ^* = 60°(б); σ^* = 30°(в)

Расчет изолинии основан на последовательной обработке специального массива значений, формируемого для каждого уровня концентрации. На этапе инициализации модели начальные индексы (или адреса элементов) во всех массивах совпадают. На

этапе формирования эллипса рассеивания, после генерации и обработки переходов n частиц примеси, из массива значений, соответствующего некоторому значению c^* концентрации примеси, исключаются элементы с меньшим уровнем концентрации ($c < c^*$). Результирующий массив характеризует границу зоны опасного загрязнения, воспроизводимую в виде изолинии концентрации c^*.

Алгоритм поиска решения. Разработка фронтального алгоритма обусловила переход к глобальным алгоритмам упорядоченного поиска опорного решения в схеме ассимиляции наблюдений. Рассмотрим один из эффективных методов случайного поиска оптимального решения для большого класса задач [9] – алгоритм поиска на основе модификации метода отжига AdaptiveSimulatedAnnealing [8]. Реализация алгоритма характеризуется малым объемом сопутствующих вычислений, что обеспечивает возможность поиска решения, близкого к глобальному, даже в случае дефицита вычислительных ресурсов.

Схема обработки данных, детально описанная в предыдущейпубликации авторов [2], содержит алгоритм волновой трассировки, учитывающий эффекты взаимодействия с препятствиями. В целевую функцию поиска решения включены штрафные коэффициенты, гарантирующие выбор пессимистического сценария моделирования. Наилучшему решению соответствуют расчетные параметры модели, при которых достигается минимальное координатное расстояние от воспроизводимой изолинии до точки замера концентрации. Результаты экспериментов показали, что классическая аддитивная свертка способна отдавать предпочтение одним частным критериям в ущерб остальным. Поэтому в целевой функции применено максиминное правило, агрегирующее наибольшее отклонение прогнозных значений от фактических данных. Функционал Δ_0 позволил определить решение, компромиссное для всех замеров концентрации:

$$\Delta_0 = \max_{i \in N} | F(p_1, p_2, p_3, ..., p_n, x_i) - c_i | \rightarrow \min, \qquad (2)$$

где i – номер датчика; N – общее количество датчиков концентрации;функция F характеризует фронтальную клеточную модель x_i – координаты расположения i-го датчика на карте местности; c_i – показание измерения i-го датчика.

Однако критериальная оценка Δ_0 ограничена выбором только одного варианта из множества возможных частных критериев, что приводит к потере информации о расстоянии до каждого замера.

Для первичной оценки параметров модели целесообразно использовать результаты моделирования, полученные на основе аналитического решения уравнения Гаусса [10] (при непрерывном точечном выбросе и постоянной скорости ветра) без учета эффектов взаимодействия с препятствиями. После загрузки карты местности с контурами препятствий и ввода данных мониторинга оценки параметров итерационно уточняются в схеме глобального поиска опорного решения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ниже приведены результаты оценки параметров фронтальной модели на основе частных решений уравнения Гаусса (пример 1), а также данных полевых наблюдений с учетом эффектов взаимодействия с препятствиями (пример 2). Для решения задач имитационного моделирования авторами использовался программный макет СППР, реализованный в программной среде C++/CLI на аппаратной платформе двуядерного процессора Intel(R) Pentium(R) CPU G3240@ 3.10GHz с оперативной памятью 8,00 ГБ.

Пример 1

Условия эксперимента:

область моделирования – массив 100х100 клеток;

эталонная модель – Гауссова модель с параметрами: мощность выброса 30 г/с, скорость ветра 2 м/с, коэффициент шероховатости z_0 = 3,7, устойчивость атмосферы p = 0,5;

метод поиска – алгоритм Нелдера – Мида;

целевая функция задана функционалом Δ_0;

состоит из 100 имитационных экспериментов;

размер ячейки 1 м.

На рис. 4 представлены результаты визуализации области выброса после подбора параметров модели: семейство изолиний отображает частные решения Гауссовой модели; цветная схема с палитрой концентрации (в мг) характеризует результаты прогона фронтальной модели. Расчетные профили концентраций приведены на рис. 5,6.

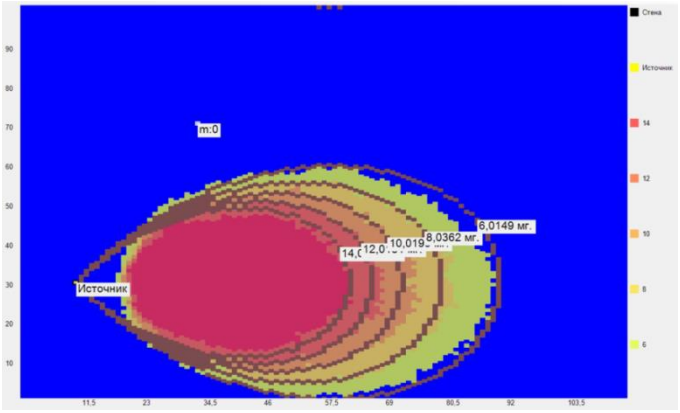


Рис. 4. Результаты визуализации области выброса
с использованием модели Гаусса

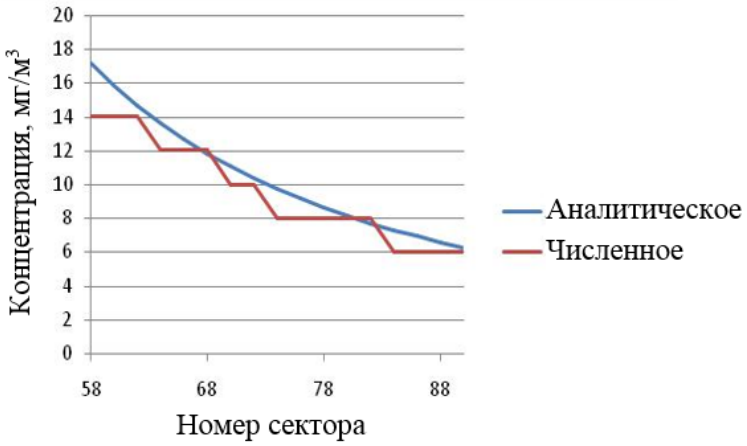


Рис. 5. Профиль концентрации вдоль оси выброса (31-й сектор по оси *oy*)

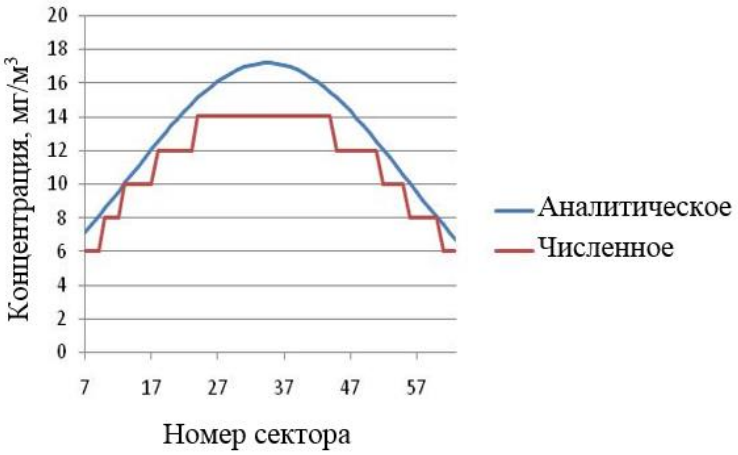


Рис. 6. Профиль концентрации перпендикулярно оси выброса
(58-й сектор по оси *ox*)

Пример 2

Использованыполевыенаблюдениявусловияхзастройкиместности [11]. Схема размещения датчиков приведена на рис. 7.

Условия эксперимента:

размер площади моделирования 200x200 секторов;

метод поиска – имитация отжига (начальная температура отжига t = 5°C, коэффициенты p = 1 и q = 1);

целевая функция – функционал Δ_0;

модель на основе фронтального алгоритма с формированием списка направлений;

направление ветра юго-восточное.

Выполнена и обработана выборка из пяти вариантов (l= 5) поиска опорного решения, в каждом варианте реализована серия из 100 прогонов имитационной модели. На рис. 7 представлены сводные результаты визуализации области выброса с использованием данных полевых наблюдений. Временные графики изменения целевой функции Δ_0 в ходе подбора параметров модели и суммарные временные затраты на поиск решения приведены на рис. 8,9.

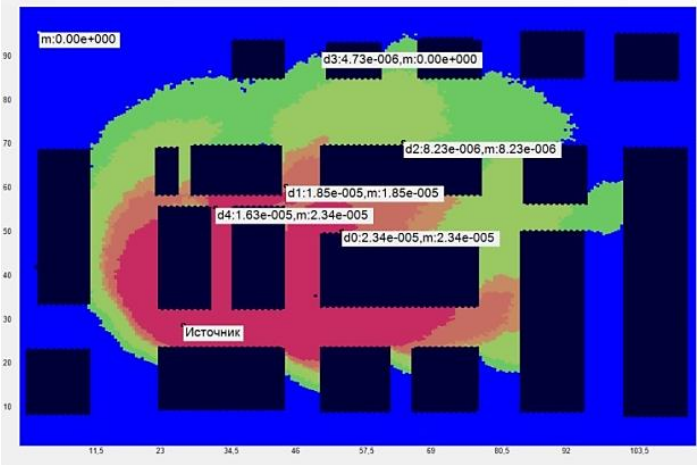


Рис. 7. Результаты прогона фронтальной модели
с учетом полевых наблюдений

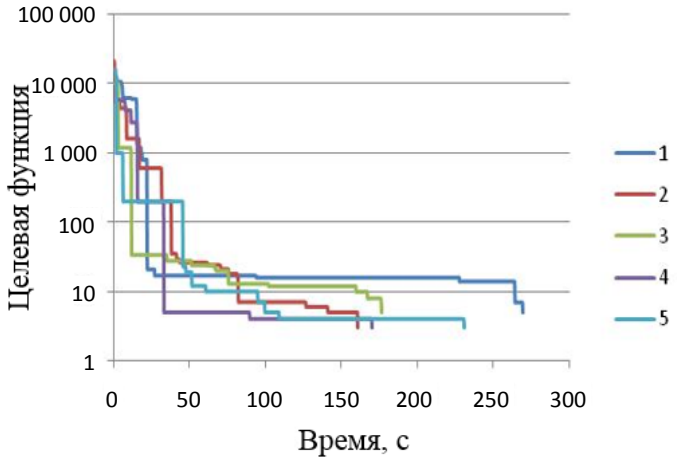


Рис. 8. Графики изменения целевой функции Δ_0
при подборе параметров модели

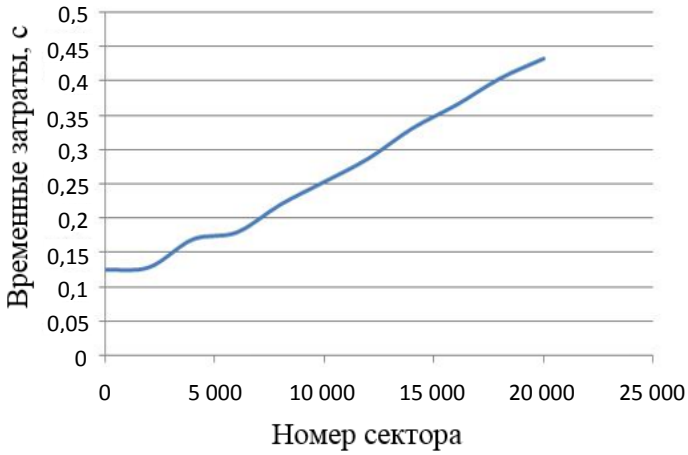


Рис. 9. Сводная зависимость временных затрат на поиск решения
от числа смоделированных секторов выброса (выборка из пяти вариантов поиска)

Средний (по выборке) показатель временных затрат на поиск решения с погрешностью отклонения $\Delta_0 \leq 6$ секторов составляет 200 с, со стандартным отклонением результата $\sigma = 47$ с. Дальнейшее снижение затрат может быть получено при более «тонкой» настройке алгоритма имитации отжига (уточнении параметров *t*, *p* и *q*). Представленная на рис. 9 зависимость временных затрат на поиск решения имеет близкий к линейному характер изменения, что свидетельствует об эффективной работе фронтального алгоритма при повышении уровня детализации зоны загрязнения.

Ограничения симуляции пристеночного ветра, обусловленные отсутствием элементов в одном или нескольких списках, могут быть преодолены с использованием «моделей воздушных потоков» [12]. Такая модификация фронтального алгоритма будет представлена в последующих статьях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В системе анализа и визуализации последствий аварийных выбросов возможны значительные затраты вычислительных ресурсов, связанные с имитацией полета частицы в условиях застройки местности, особенно при высоком уровне детализации зоны загрязнения. Для увеличения производительности системы использован

фронтальный подход к описанию облака выброса и разработан алгоритм клеточной модели, который учитывает эффекты взаимодействия с препятствиями. Результаты моделирования показали, что алгоритм может быть применен в комплексе со стандартными верифицированными методиками для расчета параметров и визуализации опасной зоны загрязнения при локальном масштабе аварии. Для уточнения прогнозов супервизорной поддержки необходимо дальнейшее развитие фронтального подхода на основе моделей воздушных потоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mazzola T., Hanna S., Chang J., Bradley S., Meris R., Simpson S., Ek N. Results of comparisons of the predictions of 17 dense gas dispersion models with observations from the Jack Rabbit II chlorine field experiment // *Atmospheric Environment*. 2021. V. 244. P. 1–14.

2. Чернышев Л.О., Матвеев Ю.Н. Компьютерная система визуализации анализа последствий аварийных выбросов в условиях промышленной застройки местности // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2022. №2. С. 60–63.

3. Матюшкин И.В., Заплетина М.А. Обзор по тематике клеточных автоматов на базе современных отечественных публикаций // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2019. Т. 11. № 1. С. 9–57.

4. Чернышев Л.О., Матвеев Ю.Н. Автоматизированная система поддержки принятия решений для прогнозирования процессов рассеивания химически опасных веществ // *Программные продукты и системы*. 2021. Т. 34. № 2. С. 307–315.

5. Мину М. Математическое программирование. Теория и алгоритмы. М.: Наука, 1990. 488 с.

6. Бандман О.Л. Клеточно-автоматные модели пространственной динамики.*Системная информатика*:*сборник трудов; под ред. А.Г.Марчука*. Новосибирск: СОРАН, 2006. С. 59–113.

7. Bandman O.L. Invariants of cellular automata models for reaction-diffusion processes // *Applied Discrete Mathematics*. 2012. № 3. P. 108–118.

8. Ingber L. Adaptive simulated annealing (ASA): Lessons learned // *Journal Control and Cybernetics*. 1996. № 25. P. 33–54.

9. Лопатин А. С. Метод отжига // *Стохастическая оптимизация в информатике*. 2005. Т. 1. № 1. С. 133–139.

10. Newman J.P. Maier H.R., Riddell G.A., Zecchin A.C., Daniell J.E., Schaefer A.M., Newland C.P. Review of literature on decision support systems for natural hazard risk reduction: Current status and future research directions // *Environmental Modelling & Software*. 2017. V. 96. P. 378–409.

11. Martin D.,Nickless G., Price C.S., Britter R.E., Neophytou M.K., Cheng H., Shallcross D.E. Urban tracer dispersion experiment in London (DAPPLE) 2003: field study and comparison with empirical prediction // *Atmospheric Science Letters*. 2010. V. 11. № 4. P. 241–248.

12. Finardi S.,Morselli M. G., Jeannet P.Wind flow models over complex terrain for dispersion calculations // *Cost Action*. 1997. V. 710.P. 51.

Для цитирования: Матвеев Ю.Н., Чернышев Л.О. Алгоритм фронтального моделирования в системе анализа и визуализации последствий аварийных выбросов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Техническиенауки». 2022. № 3 (15). С. 68–77.

УДК 658.588.2

СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ПРОГАРЕ ФУРМЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

М.Ю. РЯБЧИКОВ, канд. техн. наук, Е.С. РЯБЧИКОВА, канд. техн. наук,
Е.С. МУХИНА, ст. препод., М.А. ТАРАСОВ, студ.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38, e-mail: mr_mgn@mail.ru

© Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Мухина Е.С., Тарасов М.А., 2022

Статья посвящена совершенствованию существующих способов прогноза прогара фурмы с применением хорошо известного технологического параметра, характеризующего перепад расхода охлаждающей воды на входе и выходе фурмы. Отличительной чертой предложенной системы является двухуровневый прогноз в виде сигналатревоги и предупреждения о прогаре. Прогноз выполняется на основе автоматизированного анализа по ретроспективным данным статистических свойств перепада расхода охлаждающей воды. Приведены примеры динамики изменения перепада расхода охлаждающей воды на фурме перед прогаром и непосредственно при прогаре. Представлена структура системы предупреждения, а также показаны примеры ее работы в ситуациях, когда прогар развивается постепенно и лавинообразно.

Ключевые слова: прогар фурмы, доменная печь, прогноз, диспетчерское управление, обработка ретроспективных данных.

ВВЕДЕНИЕ

К металлургическому производству предъявляются высокие требования в области качества продукции, охраны труда и экономических показателей. Поэтому часто на первый план выходит задача предупреждения различных нештатных ситуаций, приводящих к различным неблагоприятным последствиям, таким как нарушение хода технологического процесса, разрушение технологического оборудования вследствие аварий, нанесение вреда здоровью персонала и т.д.

Так, в условиях доменного производства своевременная реакция технологов на выход из строя оборудования доменной печи позволяет заблаговременно скорректировать режимы работы и уменьшить время простоев при выполнении ремонтных мероприятий.

Прогар фурмы относится к разряду значительных аварийных ситуаций, при которых требуется незамедлительная, а нередко и аварийная остановка доменной печи для замены сгоревшей фурмы. Причины прогара могут быть различны. Согласно [1] при попадании на фурму жидкого чугуна в зоне контакта на водоохлаждаемой поверхности образуется паровая подушка, которая создает неохлаждаемый водой очаг. Автором [2] установлено, что прогар может быть связан с попаданием капель перегретого чугуна на обнаженную часть фурмы при разрушении гарнисажа над ней. Прогар фурмы приводит к различным негативным последствиям для эксплуатации доменной печи, оборудования печи, а также влечет серьезные риски для жизни и здоровья технологического и обслуживающего доменную печь персонала. В [3] указывается, что наиболее травмоопасными являются доменное и сталеплавильное производства,причем большая часть аварий происходит из-за взрывов и прогара фурм.

Несмотря на важность оперативной диагностики прогара фурмы, факт возникновения прогара по-прежнему часто определяется несвоевременно вследствие

человеческого фактора. В то же время значительные объемы накопленных технологических данных могут послужить основой для разработки системы автоматического предупреждения о прогаре. Подобная система должна позволить снизить, например, риск таких серьезных последствий прогара, как вынос фурменного прибора из печи.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ СПОСОБЫ ДИАГНОСТИКИ ПРОГАРА

Самым распространенным способом диагностики прогара является наблюдение за состоянием фурм по разности расходов воды на входе и выходе фурмы и по разности температур, подходящей к фурме и отходящей от нее охлаждающей воды. В то же время значения данных технологических параметров неодинаковы для разных фурм одной и той же доменной печи и меняются с течением времени вследствие различных технологических возмущений. Это приводит к тому, что персонал, как правило, диагностирует уже явный факт прогара при отсутствии существенного запаса времени на принятие мер по предотвращению и устранению возможной аварийной ситуации.

Первые предложения по разработке и установке систем сигнализации прогара фурмы относятся к началу прошлого века. Так, в [2] предложена разработка, направленная на определение факта и места прогара. Достигается это включением в трубу, подающую воду, полого тела с находящимся внутри негопоплавком, сопряженным с контактным приспособлением, которое при опускании поплавка в случае увеличенного расхода воды замыкает электрическую цепь соответствующей лампочки в световой сигнализации и дает тревожный звонок. Алгоритм предполагает срабатывание сигнализации при сильном изменении уровняводы, обусловленном резким изменением ее расхода. Недостатком способа является то, что индивидуальные особенности работы отдельных фурм требуют определения некоторого порога нечувствительности. Как следствие, сигнализация сработает уже при наличии явного факта прогара.

Развитие систем дистанционного контроля с применением вычислительной техники позволяет операторам решить задачу дистанционного наблюдения за состоянием фурмы напрямую, путем контроля расходов и температуры подходящей и отходящей от фурмы воды. Подобные решения предложены в [4, 5].

Основой системы [4] является предложение по использованию электромагнитных расходомеров, обеспечивающих контроль расхода воды в исходящих и напорных трубопроводах системы охлаждения воздушных фурм. В [5] описано использование малоинерционных и достаточно чувствительных датчиков для измерения температуры воды на входе и выходе теплового агрегата. В качестве подобных датчиков предлагается применять малоинерционные генераторы, где скважность импульсов является функцией температуры. Предлагается измерять температуру на входном и выходном трубопроводах фурменного хладагента и следить за разностью этих температур во времени. В случае прогара фурмы или разрыва ее по сварочному шву происходит резкое возрастание температуры исходящего из теплового агрегата потока воды, а также повышение регистрируемой разности температур до критического значения. Причем критическое значение разности температур, соответствующей прогару, определяется заранее на основе данных о конструкции фурмы. Недостаток способов [4, 5] связан с отсутствием учета возможного постепенного изменения характеристик фурм и их отклонения от исходных проектных уровней. Однако фурма может при этом прослужить еще достаточно много времени.

Дальнейшее развитие идеи использования данных о расходах и температуре воды на входе и выходе фурмы представлено в работе [6]. Применяемые алгоритмы предполагают интеллектуальную обработку данных. В этом методе определяют разность расходов входящего и выходящего потоков охлаждающей фурму воды и

вычисляют среднее значение разности температур входящего и выходящего потоков. В случае увеличения среднего значения разности температур при значении разности упомянутых расходов потоков воды в пределах суммарной погрешности измерения расходомерами регистрируют начало разрушения теплоизоляции. В случае если разность упомянутых расходов больше погрешности измерения расхода расходомерами, регистрируют прогар теплоизоляции фурмы. Метод позволяет определить начало разрушения теплоизоляции со стороны дутьевого канала воздушной фурмы доменной печи и, соответственно, начало либо приближение прогара самой воздушной фурмы доменной печи. Использование расчета среднего значения технологического показателя и данных о погрешности измерения делает способ более универсальным. Однако неясно, как связана степень оперативности формирования предупреждения с достоверностью прогноза.

В целом контроль перепада расхода воды на охлаждение фурмы является одним из важных параметров контроля безопасности процесса. Следует отметить, что прогар фурмы не всегда сопровождается утечкой воды, подаваемой на охлаждение фурмы. Однако именно утечка воды создает одну из наиболее опасных ситуаций. Согласно [7] особенно опасна встреча газов с воздухом дутья в присутствии воды вследствие течи фурм. Температура газов и дутья в фурменном приборе может оказаться ниже температуры их воспламенения вследствие потери тепла на испарение воды. В результате образуются взрывоопасные газовоздушные смеси.

Получение достоверного прогноза состояния фурмы с использованием данных о температуре воды связано с моделированием теплообмена в элементах конструкции фурмы. Данное направление развивается [1, 8, 9], и, вероятно, в будущем следует ожидать интеграции подобных моделей в состав комплексных моделей доменного процесса. Это позволит в полной мере извлечь пользу из контроля температуры воды, охлаждающей фурму.

Кроме контроля расхода и температуры воды, охлаждающей фурму, известны и другие методы диагностики прогара.

Например, в работе [10] рассматриваются преимущества визуального контроля работы фурм через смотровое отверстие воздушной фурмы. Авторы указывают, что такой контроль более универсален и позволяет оценить физическое состояние различных элементов конструкции фурмы, процесс подачи природного газа и утечку воды.

Так, в условиях одного из предприятий металлургической промышленности предусмотрен визуальный контроль работы фурм через смотровое отверстие воздушной фурмы доменной печи, снабженного интеллектуальным видеодатчиком [11]. При этом возможны видеосъемка, отображение, сохранение и воспроизведение архивной видеоинформации работы фурменных зон. Программное обеспечение позволяет отображать характер протекающих процессов на экране монитора. В то же время движение материалов в области фурменных очагов происходит чрезмерно интенсивно для визуального наблюдения человеком (рис. 1). Как правило, оператор способен оценить яркость свечения, но и это может осложняться разным исходным нормальным уровнем свечения для различных фурм. Как следствие, визуально оператор-человек способен диагностировать таким способом относительно ограниченный набор ситуаций(например, когда часть видеоизображения перекрыта статичными и неподвижными массами материалов). Данное перспективное направление, вероятно, получит развитие в будущем, при разработке способов автоматического интеллектуального анализа видеоизображения, что соответствует выводам, сделанным в [10].

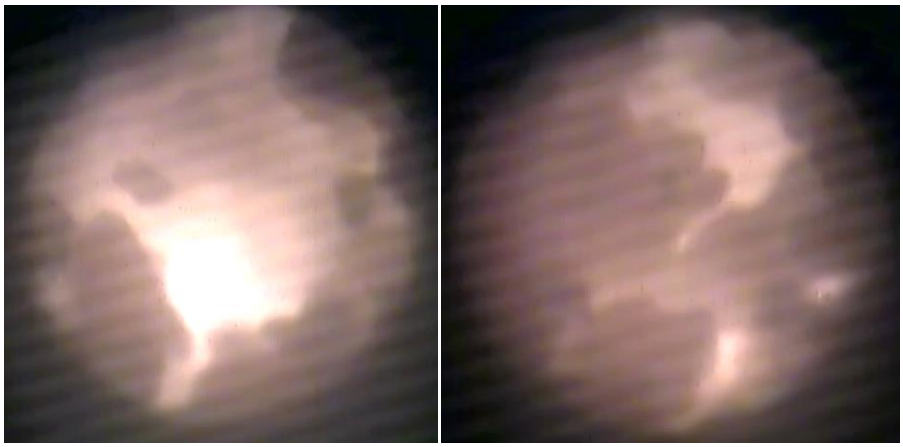


Рис. 1. Изображения с камеры смотрового отверстия фурмы доменной печи №10 с интервалом в 1 с

Известен также предложенный в [12] способ контроля прогара воздушных фурм доменной печи, основанный на измерении разности электрических потенциалов на кожухе доменной печи. Измеряют разность электрических потенциалов на фурмах, общую разность потенциалов между кольцевым воздухопроводом и кожухом печи в районе лещади, частные разности потенциалов между каждой фурмой и кольцевым воздухопроводом или кожухом печи в районе лещади. Определяют отношение частных разностей потенциалов к общей и о прогаре фурм судят по росту этого отношения до уровня от четырех до восьми, а также по изменению полярности электрического потенциала на фурме. К недостаткам данного способа можно отнести использование при диагностике косвенного показателя, который может изменяться в достаточно широком диапазоне. Это требует подстройки такой системы к условиям работы отдельной печи и фурмы с участием человека – специалиста по настройке подобных систем.

Исходя из отмеченных особенностей, следует подчеркнуть, что в настоящее время целесообразно дальнейшее совершенствование диагностики прогара с участием технологических переменных, хорошо знакомых персоналу предприятия и доказавших свою надежность, для совершенствования системы диагностики прогара с использованием данных контроля расхода воды на охлаждение фурмы. Именно этот технологический параметр дает наиболее достоверную информацию об утечке воды.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЯЕМОГО НА ПРЕДПРИЯТИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИСПОСОБА ДИАГНОСТИКИ

В настоящее время основным параметром контроля состояния фурмы и обнаружения наступления прогара фурм изначально является разность расходов охлаждающей воды на подводе к фурме и на отводе от нее. Для сигнализации о прогаре фурм в существующих системах диспетчерского контроля принято значение разности расходов, равное 1 м³/ч, сигнал о превышении которого выводится на экран монитора. Таким образом, оператор получает информацию о факте прогара фурмы.

На рис.2 приведен сравнительный график разности расходов воды на подводе и на отводе от фурмы №9 доменной печи (ДП) №10, исправной в течение рассматриваемого интервала времени, и фурмы №10, у которой произошел прогар. Видно,что перепады расходов для разных фурм могут существенно различаться. Кроме того, анализ данных за значительные интервалы времени показал значительный дрейф нормальных значений перепадов расхода на фурму в течение периода ее эксплуатации. Именно поэтому для того, чтобы избежать ложных тревог о прогаре, критический уровень перепада расхода принят на достаточно высоком уровне в 1 м³/ч.

Рис. 2. Сравнительный график разности расходов воды на подводе и на отводе исправной фурмы №9 и прогоревшей фурмы №10 ДП 10

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ СПОСОБ ДИАГНОСТИКИ ПРОГАРА ФУРМЫ

Значительные объемы накопленных данных по работе разных фурм позволяют оценить статистические особенности динамики изменения перепада расхода воды на фурме.Динамика оценивалась по скоростиизменения перепада расхода охлаждающей воды на фурме. Скорость изменения переменной «разность расходов охлаждающей воды на подводе и отводе от фурмы» при нормальной работе фурмы с высокой вероятностью находится в определенном диапазоне. Появление существенно отличающихся скоростей, т.е. маловероятных скоростей изменения параметра, – признак приближающегося прогара. Для проверки этого факта предварительно были изучены данные, полученные при нормальной работе различных фурм в разные периоды времени и непосредственно незадолго до их прогара.

По данным о нормальной работе фурм были определены усредненные критические значения фильтрованной скорости V изменения перепада расхода на фурме, превышение которых маловероятно. Параметры фильтра в виде апериодического звена второго порядка подбирались путем вычислительных экспериментов. Для определения критических значений была получена функция плотности распределения значений V по данным о нормальной работе фурм. Была произведена аппроксимация полученной функции плотности распределения нормальным законом распределения (рис. 3).

Полученную усредненную функцию интегрального распределенияиспользовали для определения критических значений V. На рис. 4 в качестве примера показано критическое значение V, превышение которого возможно с вероятностью $\alpha = 0{,}02$ ($P = 1 - \alpha = 0{,}98$).

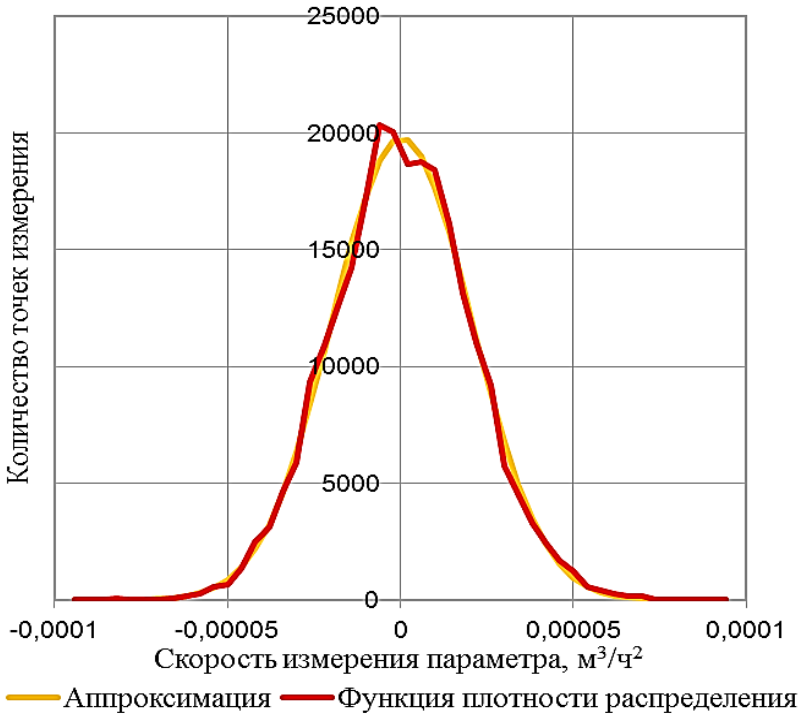


Рис. 3. Функция плотности распределения значений *V*

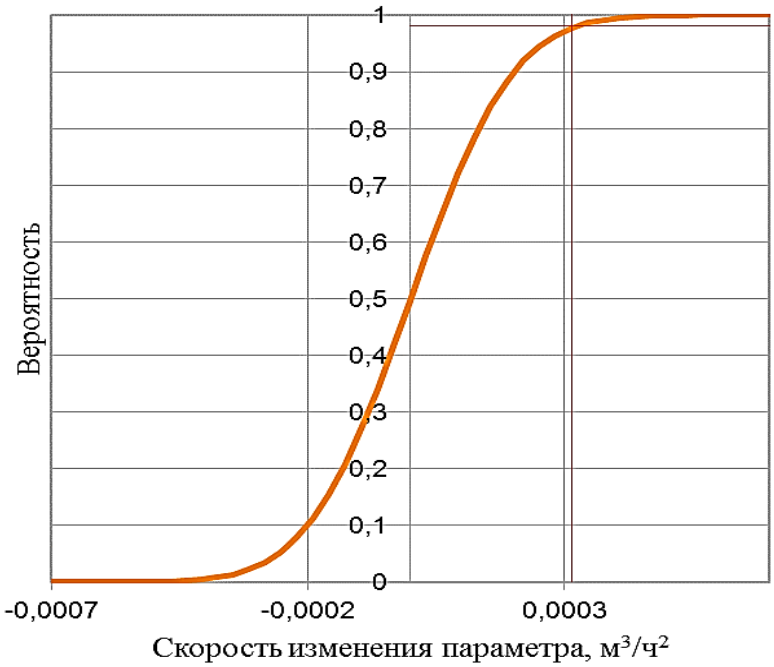


Рис. 4. Интегральная функция распределения и критическое значение *V* = 0,000 32, превышение которого возможно с вероятностью 0,02

Очевидно, что критическое значение скорости *V* будет периодически превышаться и при нормальной работе фурмы. В основе предлагаемого способа диагностики прогара лежит гипотеза о том, что по мере приближения состояния фурмы

к активному развитию прогара, критические значения скорости V будут превышаться более часто и на большую величину. В качестве примера рассмотрим (рис. 5), как соотносятся значения модуля Vс критическим значением V. С учетом модуля превышение критического значения при нормальном режиме работы возможно с вероятностью $2\alpha = 0{,}04$.

Для формирования сигнала предупреждения о прогаре фурмы интегрировали величины ΔV, которые определяются моментами превышения V критического уровня $V_{крит}$:

$$\Delta V = \begin{cases} 0 \text{ при } V \le V_{крит}, \\ V - V_{крит} \text{ при } V > V_{крит}. \end{cases}$$

Интегрирование значений ΔV осуществляется за ограниченный интервал времени. Для полученного интеграла Sпроизводится дополнительное сглаживание значений путем расчета скользящего среднего значения $S_{ср}$. Полученный показатель $S_{ср}$ сравнивается с подобранным граничным уровнем для формирования дискретного сигнала $D_{п}$ предупреждения о вероятном приближении прогара. Далее дискретный сигнал предупреждения $D_{п}$ также сглаживается путем расчета скользящего среднего $S_{п\ ср\ знач}$ и сравнивается с критическим уровнем $K_{пт}$. При превышении критического уровня формируется сигнал тревоги о прогаре фурмы $D_{т}$.

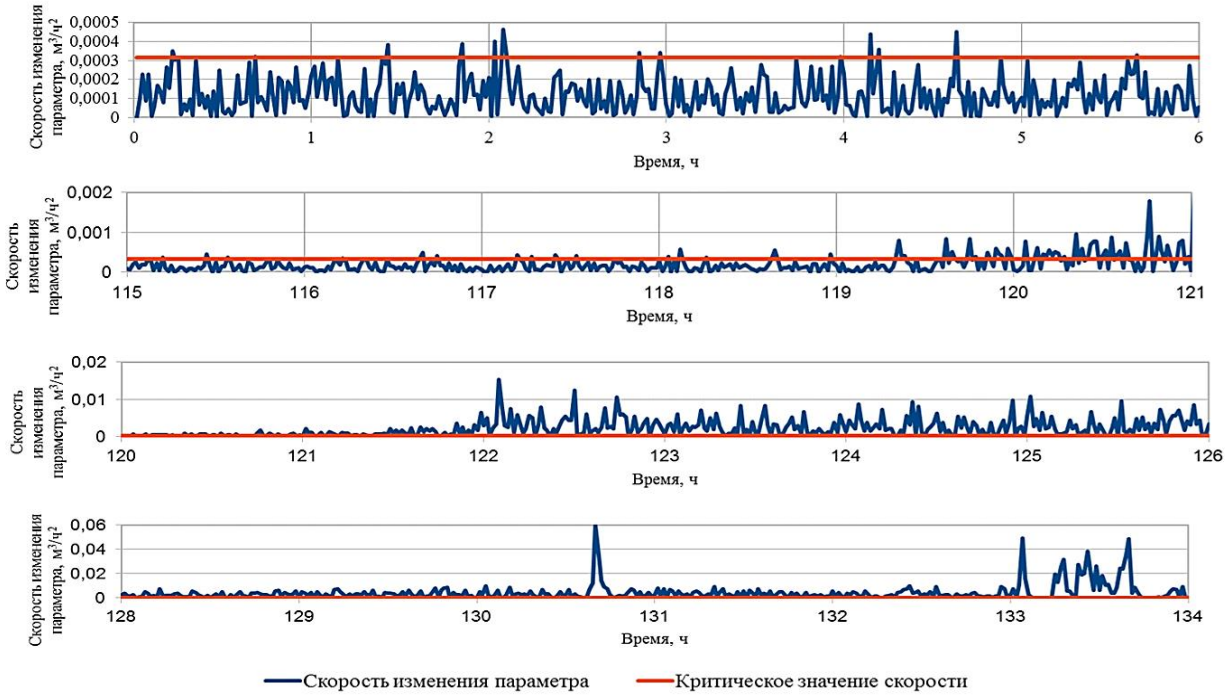


Рис. 5. Динамика изменения abs(V) перед и после прогара фурмы №10 ДП 10 и критическое значение V при $\alpha = 0{,}02$

На рис.6 представлен пример формирования импульсов предупреждения и тревоги. Видно, что по мере приближения к моменту возникновения прогара чаще срабатывают сигналы предупреждений и в итоге включается сигнал тревоги.

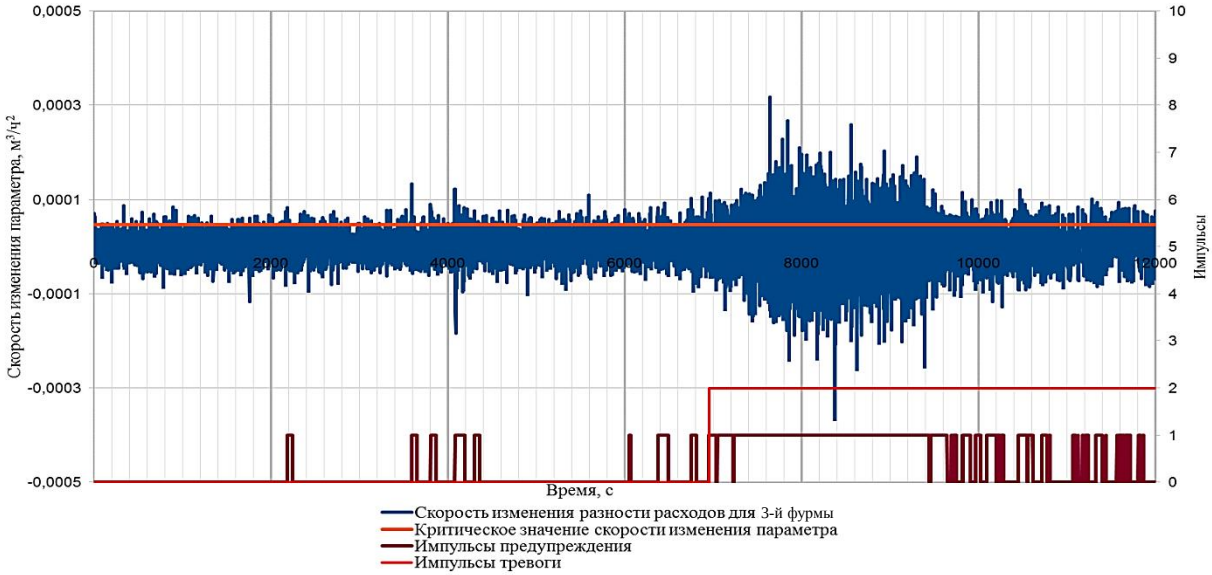


Рис. 6. Формирование импульсов предупреждения и тревоги (α = 0,01) перед прогаром фурмы №3 ДП10

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ПРОГАРЕ ФУРМЫ

Структурная схема разработанной системы двухуровневого предупреждения о прогаре фурмы ДП представлена на рис. 7.

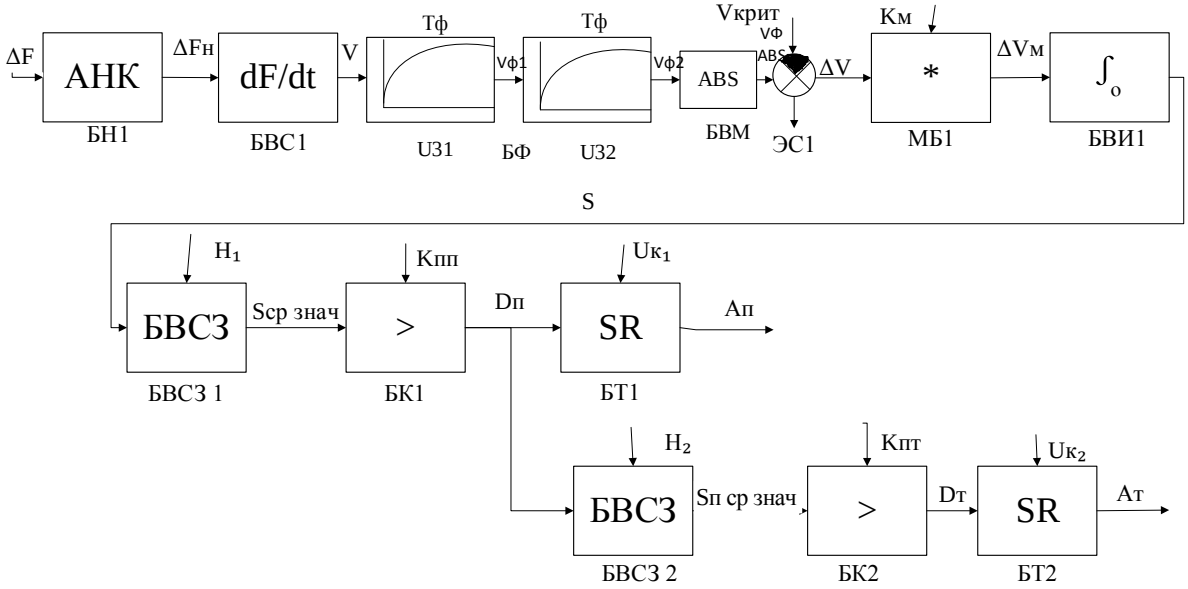


Рис. 7. Структурная схема системы предупреждения о приближении прогара: АНК – алгоритм нормализации и компактирования; БВСЗ – блок вычисления среднего значения; SR – триггер включения сигнала для системы оповещения; БВС – блок вычисления скорости; МБ – блок масштабирования; ЭС – элемент сравнения; БК – блок компаратора; БТ – блок триггера; БН – блок нормализации; БВИ – блок вычисления интеграла

Данные поступают на блок нормализации БН1, после чего вычисляется скорость V в блоке БВС1 по величине $\Delta F_н$ (нормализованный массив данных разности расходов). Значения вычисленной скорости фильтруются в блоках фильтрации БФ (U31 и U32), вычисляются модули скоростей в блоке БВМ, после чего они сравниваются с критической скоростью на элементе сравнения.

Элемент сравнения ЭС1 вычитает из полученных значений фильтрованной скорости изменения расходов $V_{ф2}$ критическое значение скорости $V_{крит}$. Полученные значения ΔV масштабируются блоком масштабирования МБ1, который является блоком умножения входной величины на коэффициент $K_м$.

Блок БВИ1 обрабатывает данные согласно вышеприведенному выражению и рассчитывает интеграл $\Delta V_м$. По полученному набору значений интегратора вычисляется скользящее среднее значение в блоке БВС31. Вычисленное среднее значение поступает на блок компаратора БК1, формирующий внутрисистемные импульсы. Эти импульсы поступают на триггер БТ1, формирующий сигнал предупреждения, и по ним вычисляется среднее значение в блоке БВС32. Усредненные импульсы поступают также на компаратор БК2, сигнал которого взводит триггер сигнала тревоги БТ2.Сигналы$U_{к1}$ и $U_{к2}$ предназначены для сброса состояния триггеров.

ПРИМЕР РАБОТЫ СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ НАСТРОЙКАХ

Поиск оптимальных настроек системы предупреждения показал, что применение единых универсальных настроек снижает оперативность и достоверность прогноза. Целесообразно индивидуально вести мониторинг плотности распределений значений V при работе фурмы в нормальных условиях. Это вполне реализуемо в современных условиях. Также целесообразно установление связи коэффициента нормирования $K_м$ величин ΔV с параметрами закона распределения.

Оптимизация настроек системы прогноза по данным разных фурм необходима, поскольку в противном случае система может давать предупреждение задолго, а иногда практически перед самым прогаром. Кроме того, постоянные предупреждения о тенденции к скорому прогару могут раздражать операторов и привести к тому, что предупреждения будут проигнорированы.Работа системы при наилучших настройках представлена на рис. 8 и 9.

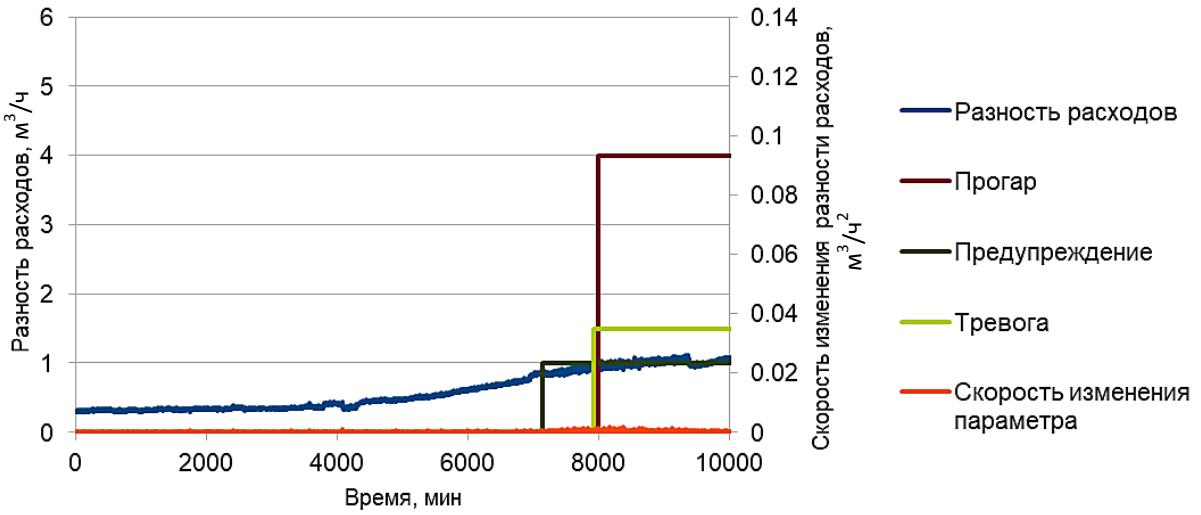


Рис. 8. Работа системы по данным от фурмы № 3 ДП10

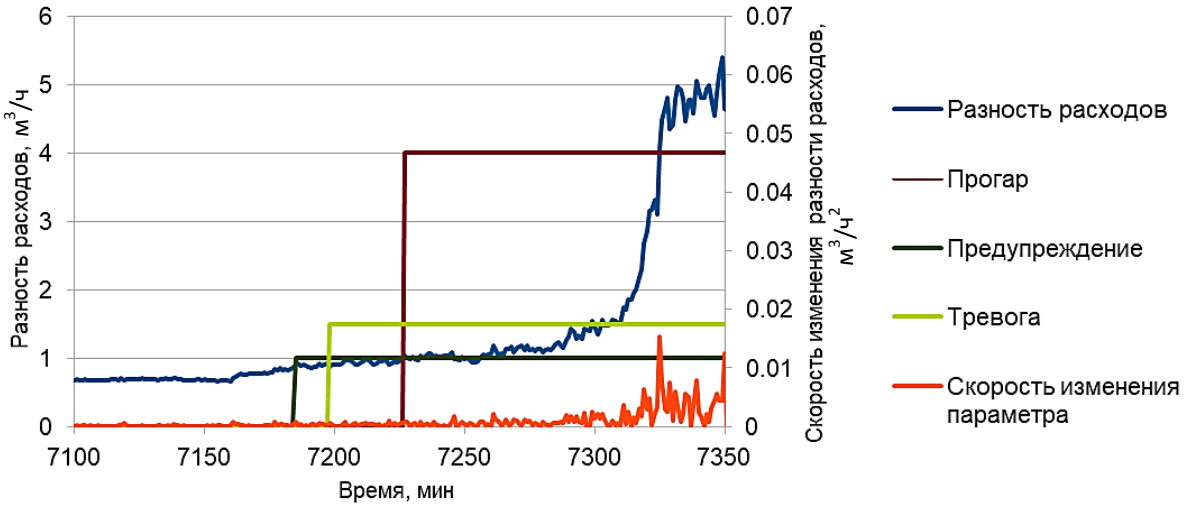


Рис. 9. Работа системы по данным от фурмы № 10 ДП10

Фурмы № 3 и 10 выбраны как показательные по той причине, что характер прогара у них кардинально отличается. Фурма №3 прогорала плавно и долго (это благоприятные условия для системы), фурма №10 – сравнительно быстро и лавинообразно, с максимально неблагоприятными условиями для прогнозирования прогара.

Для фурмы №3 предупреждение было сформировано за 371 мин до прогара, а тревога – за 69 мин. Для фурмы №10 предупреждение было сформировано за 42 мин до прогара, а тревога – за 29 мин. Подобные временные пределы оставляют персоналу достаточно времени для принятия решений.

Отметим, что оптимизация системы для ситуаций постепенного развития прогара позволяет сформировать предупреждение существенно раньше (в рассматриваемых случаях прогара фурм до трех суток).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная система предварительного предупреждения о прогарах фурм доменной печи является перспективным направлением развития и усовершенствования автоматизации доменного процесса. Система основана на вовлечении накопленных технологических ретроспективных данных в решение задачи прогноза прогара. Система направлена на снижение числа аварийных остановок доменной печи. Это обеспечит более ровный ход печи, снизит возможности повреждения оборудования цеха при прогаре фурмы, максимально исключит риски для здоровья персонала. При этом не требуется внедрение нового оборудования или новых косвенных методов контроля, которые могут потребовать сложной адаптации к условиям работы конкретной печи или фурмы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агапитов Е.Б., Болкунова В.А., Шутов К.В. Численное моделирование теплового состояния водоохлаждаемой доменной фурмы при налипании расплава шлака на ее поверхность // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2011. №4 (36). С.73–74.

2. Патент СССР 29846. *Устройства для обнаружения прогара фурм и амбразур доменных печей* / Лопатин Н.В.Заявл. 25.04.1930.Опубл. 30.04.1933.

3. Смирнякова В.В.Анализ производственной безопасности предприятий металлургической отрасли // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).* 2015. № S7. С. 669–675.

4. Патент СССР 1122703*Система сигнализации автоматического контроля и контроля прогара воздушных фурм* / Муканов Д., Ткачук Е.И., Шелухин Н.И., Миникес Э.Э., Гамалей Э.И., Лысенков С.Н. Заявл. 22.08.1983. Опубл. 07.11.1984.

5. Патент РФ 2243265 *Способ обнаружения прогара охлаждаемого теплового агрегата* / Толпа В.А., Нецветов В.И., Туник О.А., Зосимова В.Г. Заявл. 04.11.2002. Опубл.27.05.2004, Бюл. № 15.

6. Патент РФ 2613834 *Способ контроля работы воздушной фурмы доменной печи с теплоизоляцией со стороны дутьевого канала* / Радюк А.Г., Титлянов А.Е. Заявл. 22.10.2017. Опубл. 21.03.2017, Бюл. № 9.

7. Бринза В.Н., Зеньковский М.М. Охрана труда в черной металлургии. М.: Металлургия. 1982. 336 с.

8. Радюк А.Г.,Титлянов А.Е., Скрипаленко М.М. Моделирование температурного поля воздушных фурм доменных печей с помощью DEFORM 2D // *Металлург*. 2016. № 10. С. 14–17.

9. Титов В.Н.,Сайфуллаев С.Д., Скрипаленко М.М., Терновых А.И., Сидоров А.А.Исследование теплоизолирующих материалов в качестве защиты от прогара воздушной фурмы доменной печи моделированием в среде DEFORM-2D // *Металлург*. 2020. № 5. С. 15–20.

10. Мешков К.В.,Белокопытов Р.Н. Тенденции развития систем автоматизированного контроля прогара воздушных фурм доменных печей // *Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности*: *сборник научных статей V Международной научной конференции*. М.: ООО «Конверт», 2021. С. 25–28.

11. Рябчиков М.Ю., Тарасов М.А. Система предупреждения о прогарах фурм доменных печей // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. *Тезисы докладов 79-й Международной научно-технической конференции*. Магнитогорск: Магнитогорский государственныйтехнический университет им. Г.И. Носова, 2021.С. 360.

12. Патент СССР 1234437 *Способ контроля прогара воздушных фурм доменной печи* / Козодеров В.И., Рвдилов С.В., Пухов А.В., Сакиров А.Ф., Чернобривцев Б.Ф. Заявл.22.02.1984. Опубл. 30.05.1986.

Для цитирования:Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Мухина Е.С., Тарасов М.А. Система оперативного предупреждения о прогаре фурмы доменной печи // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Техническиенауки». 2022. № 3 (15). С. 78–88.

ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия «Технические науки»

Научный рецензируемый журнал
№ 3 (15), 2022

Online ISSN 2687-0029

РедакторМ.Б. Юдина
Корректор Я.А. Петрова

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22