

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  
№ 2 (22), 2024**

**Print ISSN 2658-5030  
Online ISSN 2687-0029**

Тверь 2024

**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., профессор 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»*

Гершман И.С., д.т.н., профессор ВНИИЖТ

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

*По направлению «Недропользование и горные науки»*

Валиев Н.Г., д.т.н., профессор УГГУ

Горлов И.В., д.т.н., доцент ТвГТУ

Керопян А.М., д.т.н., доцент, главный научный сотрудник ООО «МНИПИИТИ»

Кондратьев А.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Мисников О.С., д.т.н., доцент ТвГТУ

Рахутин М.Г., д.т.н., доцент НИТУ «МИСиС»

*По направлению «Информационные технологии и телекоммуникации»*

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 ТвГТУ

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», «Недропользование и горные науки», «Информационные технологии и телекоммуникации». Журнал выходит четыре раза в год.

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер: ПИ № ФС77-74321 от 19 ноября 2018 года. 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.

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Измайлов В.В., Гусев А.Ф.</i> Проводимость контактных соединений: определяющие факторы.....	5
<i>Болотов А.Н.</i> Влияние магнитного поля на хрупкое разрушение ферромагнитного материала .....	15
<i>Гусев А.Ф., Измайлов В.В., Новоселова М.В.</i> Возможности модернизированной лабораторной установки «Машина Атвуда» для исследования трения скольжения.....	23
<i>Афанасьева Л.Е., Смолякова И.А.</i> Порошковая лазерная наплавка быстрорежущей стали.....	29
<i>Измайлов В.В.</i> О некоторых корреляционных соотношениях, связанных с интенсивностью изнашивания.....	36

### НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГОРНЫЕ НАУКИ

<i>Яблонев А.Л.</i> Оптимизация угла установки фрезы торфяного бровкореза с позиции энергоемкости фрезерования .....	44
<i>Шабаетов О.Е., Довгань А.Ю.</i> Математическая модель формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке исполнительного органа проходческого комбайна.....	55
<i>Черткова Е.Ю.</i> Оценка технологического метода управления качественными параметрами торфяного сырья.....	72

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

<i>Фам К.Б., Мурашев П.М., Богатиков В.Н., Киеу С.М.</i> Автоматизированное управление процессом термообработки какао-бобов с помощью алгоритма с прогнозирующими моделями.....	81
<i>Бурдо Г.Б., Болотов А.Н.</i> Взаимосвязь автоматизированных систем управления и проектирования в машиностроительной организационно-технологической системе.....	89
<i>Ахремчик О.Л., Кузнецов Н.В.</i> Управление сушкой суспензии хлореллы с учетом вязкости.....	100

## CONTENTS

### MECHANICAL ENGINEERING

<i>Izmailov V.V., Gusev A.F.</i> Conductivity of contact connections: dominant factors.....	5
<i>Bolotov A.N.</i> Influence of magnetic field on brittle destruction of ferromagnetic material.....	15
<i>Gusev A.F., Izmailov V.V., Novoselova M.V.</i> The potential of the modernized laboratory installation “Atwood machine” for studying sliding friction.....	23
<i>Afanasieva L.E., Smolyakova I.A.</i> Powder laser cladding of high-speed steel.....	29
<i>Izmailov V.V.</i> On some correlations, related to wear rate.....	36

### SUBSOIL USE AND MINING SCIENCES

<i>Yablonev A.L.</i> Optimization of the installation angle of the cutter of the peat edge cutter from the position of energy intensity of milling.....	44
<i>Shabaev O.E., Dovgan A.Yu.</i> A mathematical model of the formation of an external disturbance vector on the axial crown of a boom-type heading machine.....	55
<i>Chertkova E.Yu.</i> Evaluation of the technological management method qualitative parameters of peat raw materials.....	72

### INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

<i>Fam K.B., Murashev P.M., Bogatikov V.N., Kieu S.M.</i> Automated control of heat treatment process of cocoa beans using an algorithm with predictive models .....	81
<i>Burdo G.B., Bolotov A.N.</i> The relationship of automated control and design systems in the machine-building organizational and technological system.....	89
<i>Akhremchik O.L., Kuznetsov N.V.</i> Control of drying of chlorella suspension taking into account viscosity .....	100

# МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 539.3

## ПРОВОДИМОСТЬ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ: ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ФАКТОРЫ

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, А.Ф. ГУСЕВ, канд. техн. наук

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

© Измайлов В.В., Гусев А.Ф., 2024

Исследовано влияние параметров дискретного контакта технических поверхностей на одну из составляющих контактного сопротивления – сопротивление стягивания. Основными факторами, определяющими электрическую и тепловую проводимость контакта шероховатых поверхностей, являются число площадок (пятен) фактического контакта пиков шероховатости и их средний размер. На основании аналитической и числовой (компьютерной) моделей контактного соединения проанализировано влияние номинального контактного давления на указанные факторы. Адекватность аналитической и числовой моделей реальным характеристикам контактного соединения проверена экспериментально. Показано, что реальный диапазон возможных изменений среднего размера площадок контакта весьма невелик, поэтому основным фактором, целенаправленным изменением которого можно снизить контактное сопротивление, остается число площадок контакта пиков шероховатости. Приведен пример такого целенаправленного изменения данного параметра контакта.

*Ключевые слова:* контакт шероховатых поверхностей, площадь контакта, число и размер площадок контакта, контактное сопротивление, сопротивление стягивания, шероховатость.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-2-5-15**

### ВВЕДЕНИЕ

Снижение потерь при передаче и распределении электроэнергии всегда было и в перспективе останется важнейшей технико-экономической задачей. Наряду с потерями энергии вследствие омического сопротивления проводников, вызванного рассеянием электронов на дефектах кристаллической решетки материала проводника, не менее существенный вклад в общий баланс потерь вносят многочисленные контактные соединения, составляющие неотъемлемую часть любой электрической цепи. Природа контактного сопротивления принципиально отличается от омического сопротивления сплошной проводящей среды и связана с двумя основными причинами [1–4]. Во-первых, это дискретность контакта технических поверхностей, вызванная их волнистостью, шероховатостью и субшероховатостью. Наличие естественного и технологического рельефа на любой технической поверхности приводит к тому, что движение носителей электрического заряда через границу двух деталей происходит только на малых участках номинальной поверхности, образованных деформацией контактирующих волн и неровностей микро- и наношероховатости. Линии тока стягиваются к этим малым пятнам фактического контакта, что проявляется в виде дополнительного

электрического сопротивления – так называемого сопротивления стягивания. Вторая причина контактного сопротивления заключается в присутствии на поверхности контакта плохо проводящих диэлектрических или полупроводниковых пленок – так называемых пленок потускнения (оксидных, сульфидных, полимерных и т.п.). Эти две причины контактного электросопротивления имеют принципиально разную физическую природу и, соответственно, требуют принципиально разных подходов для их минимизации.

В случае тепловых контактов основным требованием к контактным соединениям является малое термическое сопротивление для обеспечения эффективного теплоотвода. Одной из составляющих контактного термического сопротивления является сопротивление стягивания линий теплового тока к пятнам фактического контакта, зависящее от тех же факторов, что и контактное электросопротивление.

Цель данной статьи состоит в анализе ключевых факторов, влияющих на сопротивление стягивания, для выявления наиболее эффективных путей его снижения.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Для анализа факторов, влияющих на сопротивление стягивания контакта технических поверхностей, возможно использование следующих трех инструментов.

*Математическая модель* позволяет получить аналитические выражения, устанавливающие зависимость сопротивления стягивания от тех или иных параметров и дающие представление о степени их влияния на величину сопротивления. На основании известных работ Дж. Максвелла и Р. Хольма для сопротивления стягивания линий тока к круговому пятну контакта двух пиков шероховатости можно записать

$$R_c = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4a}, \quad (1)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – удельные сопротивления материалов контактирующих деталей;  $a$  – радиус площадки контакта [3–5].

Контакт двух шероховатых поверхностей можно рассматривать как ансамбль  $n_r$  площадок контакта ( $n_r$  – число контактирующих пиков шероховатости). Если пренебречь взаимным влиянием отдельных площадок, то контактное соединение можно представить состоящим из  $n_r$  параллельных соединений, каждое из которых имеет сопротивление, определяемое формулой (1), а общее сопротивление находится из уравнения

$$R_c = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4\bar{a}n_r},$$

где  $\bar{a}$  – средний радиус круговых пятен контакта ( $a$ -пятен по Р. Хольму).

Если контактируют детали из материалов с одинаковым удельным сопротивлением  $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ , уравнение для сопротивления стягивания приобретает вид

$$R_c = \frac{\rho}{2\bar{a}n_r}. \quad (2)$$

Взаимным влиянием отдельных площадок контакта можно пренебречь при достаточно большом среднем расстоянии  $\bar{l}$  между ними по сравнению с размерами самих площадок. Так, при  $\frac{\bar{l}}{2\bar{a}} > 10$  погрешность расчета сопротивления стягивания по

формуле (2) без учета взаимного влияния пятен контакта не превышает 15 %, а при  $\frac{\bar{l}}{2\bar{a}} > 20$  она составляет не более 10 %.

Величины  $\bar{a}$  и  $n_r$  могут быть рассчитаны на основании теоретической модели контакта шероховатых поверхностей Н.Б. Демкина [5]:

$$n_r = n_m \varepsilon^{v-1}, \quad (3)$$

$$\bar{a} = \sqrt{\frac{A_r}{\pi n_r}}, \quad (4)$$

где  $n_m$  – число выступов на уровне средней плоскости шероховатого слоя;  $v$  – показатель степени в уравнении степенной аппроксимации начального участка опорной кривой  $\eta = \frac{A_r}{A_n} = \alpha_y t_m \varepsilon^v$ ;  $A_r$  и  $A_n$  – фактическая и номинальная площади контакта соответственно;  $\alpha_y$  – коэффициент упругой осадки выступов шероховатости;  $t_m$  – относительная опорная длина на уровне средней линии шероховатости;  $\varepsilon = \delta / R_p$  – относительная деформация шероховатого слоя;  $\delta$  – абсолютная деформация шероховатого слоя (сближение контактирующих поверхностей);  $R_p$  – максимальная высота пика профиля шероховатости.

Относительная деформация контакта  $\varepsilon$  рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = \left( \frac{p_n}{\alpha_y t_m p_r} \right)^{\frac{1}{v+\omega}}, \quad (5)$$

где  $p_r$  – фактическое давление;  $\omega = 0$  и  $\omega = 1/2$  при пластическом и упругом характере деформации шероховатого слоя соответственно. Фактическое давление при пластической деформации шероховатости равно микротвердости материала контактирующих деталей, при упругой деформации шероховатости можно воспользоваться понятием упругой твердости [5] и принять  $p_r \approx 0,25 E^* \sqrt{\frac{R_p}{r}}$ , где  $r$  – средний радиус кривизны вершин пиков шероховатости;  $E^*$  – эквивалентный модуль упругости материала контактирующих деталей.

Компьютерная (числовая) модель позволяет полнее отразить основные свойства моделируемой системы, хотя, как и любая модель, остается беднее оригинала. Используемая нами компьютерная модель учитывает распределение радиусов кривизны вершин пиков шероховатости, в отличие от описанной выше модели, в которой считается, что вершины всех пиков имеют одинаковый радиус кривизны, равный среднему значению этого параметра. В компьютерной модели распределение высот пиков шероховатости и радиусов кривизны их вершин описывается гибким двухпараметрическим бета-распределением с функцией плотности вероятности

$$f(x) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1},$$

где  $x$  – случайная величина (в нашем случае высота пика или радиус кривизны его вершины);  $\alpha$  и  $\beta$  – параметры распределения;  $B(\alpha, \beta)$  – бета-функция Эйлера.

Кроме того, компьютерная модель учитывает различный характер деформирования отдельных пиков шероховатости – упругий или пластический, чего не позволяет аналитическая модель.

Входными параметрами компьютерной модели являются параметры шероховатости, физико-механические свойства материалов контактирующих деталей и номинальное давление, выходными параметрами – число контактирующих выступов  $n_r$ , средний диаметр пятен фактического контакта  $\bar{a}$  и сопротивление стягивания  $R_c$ .

Экспериментальная проверка теоретических результатов служит доказательством адекватности любой модели оригиналу. Методика экспериментального определения сопротивления стягивания контактного соединения кратко описана ниже.

## ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ СЯГИВАНИЯ

Эксперименты по измерению сопротивления стягивания в контакте шероховатых поверхностей проводились на приборе для измерения контактных деформаций [5]. Использовались цилиндрические кольцевые в плане образцы наружным диаметром 28 мм и внутренним 20 мм, контактирующие торцевыми поверхностями. Номинальная площадь контакта  $A_n = 300 \text{ мм}^2$ . Для повышения точности определения сопротивления стягивания образцы были изготовлены из хромоникелевого сплава с высоким удельным сопротивлением  $\rho = 1 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ , а для минимизации влияния поверхностных пленок потускнения имели золотое покрытие (золото считается наиболее стойким к потускнению материалом). Параметры шероховатости торцевых контактирующих поверхностей образцов были определены профилометрированием:  $R_p = 6 \text{ мкм}$ ,  $r = 30 \text{ мкм}$ . Малые размеры номинальной площади контакта в виде кольца шириной 4 мм позволяют пренебречь наличием волнистости на контактирующих поверхностях.

Измерения сопротивления стягивания проводили по известной четырехпроводной схеме методом вольтметра – амперметра. Сила тока через контакт до 10 А.

Номинальное контактное давление изменялось в диапазоне 0,1–3 МПа. Нормальная нагрузка на контакт обеспечивалась винтовым устройством прибора и контролировалась образцовым динамометром системы Н.Г. Токаря.

Результаты экспериментов в сравнении с теоретической и компьютерной моделями контакта приведены ниже.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Адекватность числовой модели контакта реальному контактному соединению подтверждается рис. 1. Величины сопротивления стягивания, рассчитанные с помощью компьютерной модели контакта и определенные экспериментально по описанной выше методике, хорошо согласуются. Как экспериментальные, так и теоретические значения  $R_c$  в зависимости от номинального контактного давления подчиняются степенному закону вида

$$R_c = K p_n^{-m}. \quad (6)$$

Если величина  $R_c$  выражена в миллиомах (мОм), а величина  $p_n$  – в мегапаскалях (МПа), то параметры в уравнении (6) имеют значения  $K = 0,10$  и  $m = 0,87$  для экспериментальных зависимостей и  $K = 0,12$  и  $m = 0,84$  для расчетных. Данные результаты дают основания для использования компьютерной модели в качестве инструмента анализа влияния различных факторов на величину сопротивления стягивания.



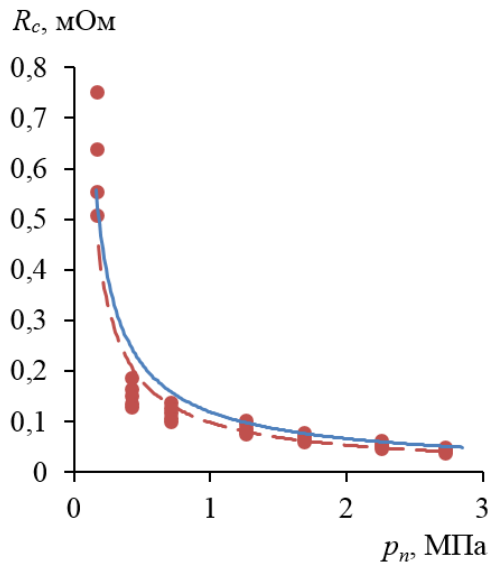


Рис. 1. Зависимость сопротивления стягивания от номинального давления: сплошная линия – результат компьютерного моделирования; точки – экспериментальные значения; пунктир – аппроксимирующая зависимость

Для модельного контактного соединения выбраны параметры реальных контакт-деталей. Материал контакт-деталей – бронза БрБ2 с удельным сопротивлением  $\rho = 0,07$  мкОм · м, твердостью  $H = 1\,500$  МПа и модулем упругости  $E = 130$  ГПа. Параметры шероховатости соответствуют обработке фрезерованием:  $R_p = 6$  мкм;  $r = 0,6$  мм;  $tm = 0,5$ .

Высоты пиков шероховатости и радиусы кривизны их вершин подчиняются бета-распределению с различными значениями параметров. Для плотности вероятности радиусов кривизны вершин выступов на основании экспериментальных данных приняты значения  $\alpha = 1,2$  и  $\beta = 3$  во всех расчетах; что же касается плотности вероятности высот пиков шероховатости, то использованы два варианта:  $\alpha = \beta = 2$  и  $\alpha = \beta = 3$ .

Результаты моделирования представлены на рис. 2–4. Из рис. 2 следует, что зависимость числа пятен фактического контакта  $n_r$  от номинального давления хорошо описывается степенными зависимостями:

при  $\alpha = \beta = 2$

$$n_r = 385p_n^{0,56};$$

при  $\alpha = \beta = 3$

$$n_r = 330p_n^{0,61},$$

где величина давления  $p_n$  выражена в мегапаскалях (МПа).

Средний радиус пятен фактического контакта  $\bar{a}$  от номинального давления зависит весьма слабо (рис. 3) – в степени  $0,11...0,15$ . При изменении номинального давления на три порядка в диапазоне от десятых долей до десятков мегапаскалей средний диаметр пятен контакта вырос всего примерно в два раза – от 4 до 8 мкм, причем практически независимо от параметров бета-распределения высот пиков шероховатости.

Результаты моделирования ожидаемо свидетельствуют, что сопротивление стягивания исследуемого модельного контактного соединения убывает с ростом номинального контактного давления по степенному закону, аналогичному уравнению (6) и зависимости, представленной на рис. 1. Зависимость  $R_c(p_n)$ , полученная с помощью числовой модели контакта, иллюстрируется рис. 4 для двух различных функций плотности вероятности высот пиков шероховатости (параметры соответствующих бета-распределений указаны в подрисуночной подписи). Как видно из рис. 4, вид функции плотности вероятности высот пиков шероховатости практически не влияет на зависимость  $R_c(p_n)$ . Соответствующие аппроксимирующие зависимости, полученные методом наименьших квадратов, имеют вид, показанный на рис. 2.

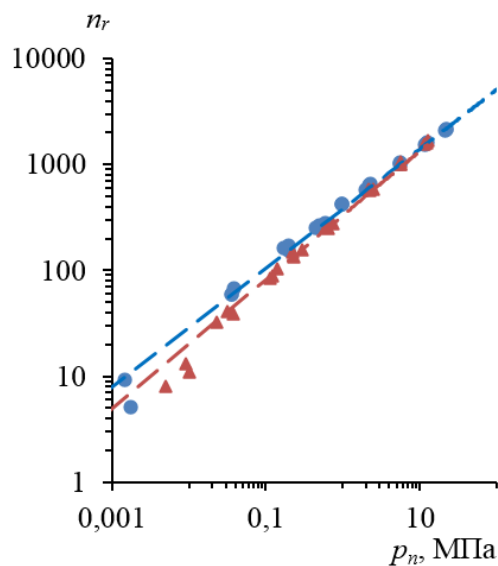


Рис. 2. Зависимость числа пятен фактического контакта от номинального давления:  
 ● –  $\alpha = \beta = 2$ ; ▲ –  $\alpha = \beta = 3$ ; пунктир – аппроксимирующие зависимости

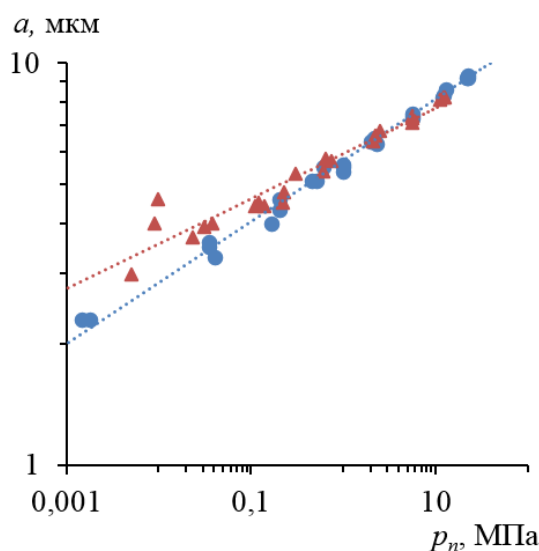


Рис. 3. Зависимость среднего радиуса пятен фактического контакта от номинального давления:  
 ● –  $\alpha = \beta = 2$ ; ▲ –  $\alpha = \beta = 3$ ;  
 пунктир – аппроксимирующие зависимости

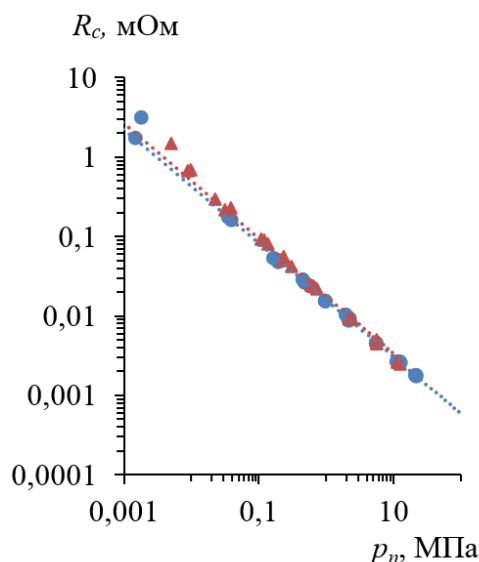


Рис. 4. Зависимость сопротивления стягивания от номинального давления:  
 ● –  $\alpha = \beta = 2$ ; ▲ –  $\alpha = \beta = 3$ ; пунктир – аппроксимирующие зависимости

При  $\alpha = \beta = 2$

$$R_c = 0,016p_n^{-0,72};$$

при  $\alpha = \beta = 3$

$$R_c = 0,018p_n^{-0,72},$$

где величина сопротивления  $R_c$  выражена в миллиомах (мОм), а величина давления  $p_n$  – в мегапаскалях (МПа).

Сопоставимые результаты дают аналитические модели контактного соединения (уравнения (3)–(5)). Сопротивление стягивания как функция номинального давления выражается аналитическими уравнениями:

при  $\nu = 3$  (примерно соответствует  $\alpha = \beta = 2$ ):

$$R_c = 0,018p_n^{-0,70},$$

при  $\nu = 3,5$  (примерно соответствует  $\alpha = \beta = 3$ ):

$$R_c = 0,025p_n^{-0,72}.$$

Из приведенных результатов численного и аналитического моделирования контактного соединения следует, что, в отличие от среднего радиуса пятен контакта, число этих пятен достаточно сильно зависит от номинального давления. Например, при увеличении номинального давления в два раза число пятен фактического контакта возрастает почти в полтора раза.

Таким образом, из двух параметров в уравнении (2) эффективно снизить сопротивление стягивания может только увеличение числа контактирующих пиков шероховатости  $n_r$ .

Один из очевидных способов увеличения числа контактирующих выступов – увеличение номинального контактного давления. Однако этот способ ограничен величиной  $n_m$  – числом пиков шероховатости на уровне средней плоскости.

Увеличение числа выступов  $n_m$  возможно за счет уменьшения среднего шага неровностей шероховатости (средняя ширина элементов профиля  $RSm$  по ГОСТ Р ИСО 4287-2014). Как известно, шаговый параметр  $RSm$  сильно коррелирован с амплитудными параметрами ( $Ra$  или  $Rp$ ), т.е. с чистотой обработки поверхности. Так, по данным Я.А. Рудзита [6] для таких методов обработки, как плоское и круглое шлифование и доводка в диапазоне  $Ra = 0,1...2,5$  мкм, корреляционная зависимость имеет вид

$$R_{Sm} \approx 0,057R_a^{0,8}$$

с коэффициентом 0,88, что считается высокой степенью корреляции. Таким образом, малый шаг неровностей достижим за счет более высокой чистоты поверхности. Однако это требует изменения технологических режимов обработки или даже изменения самой технологии.

Для данного конкретного способа и конкретных режимов обработки поверхности увеличение числа  $n_m$  возможно только за счет увеличения номинальной площади контакта. Тогда пропорционально возрастет число пиков  $n_m$ . Однако при этом также пропорционально возрастет сила нажатия (нормальная нагрузка) в контакте, что не всегда возможно. Кроме того, с ростом номинальной площади контакта возрастает негативное влияние волнистости и макроотклонений формы поверхности. Оптимальным решением является разделение одного контактного соединения на два независимых параллельных соединения. Это решение иллюстрируется рис. 5 на примере болтового соединения двух шинопроводов. На рис. 5а схематически показано одноболтовое соединение двух плоских шинопроводов. Увеличение номинальной площади контакта (рис. 5в) требует увеличения усилия нажатия, что достигается применением двухболтового соединения. Однако неравномерность распределения нагрузки вследствие отклонений формы поверхности и влияния волнистости не позволяет снизить сопротивление пропорционально увеличению номинальной площади контакта. В работах Н.Н. Дзекцера предложено выполнять продольный разрез шин в области их контактирования, как показано на рис. 5б. По сути, этим и достигается создание двух независимых параллельных контактных соединений. Аналогичный способ снижения контактного сопротивления предложил М. Браунович для высоковольтных контактных соединений. Как показали эксперименты, применение контактных соединений, выполненных по аналогичной рис. 5б схеме, позволяет снизить сопротивление контакта в 1,3...1,5 раза по сравнению со схемой, аналогичной рис. 5в [3].

Кардинально снизить сопротивление стягивания в электроконтактном соединении можно, устранив саму причину стягивания линий тока – дискретность контакта. Для этого межконтактный зазор заполняется проводящей средой, например токопроводящей смазкой или жидким металлом [7–9]. В этом случае контактное соединение, оставаясь разборным по конструкции, приобретает все преимущества неразборных сварных и паяных электроконтактных соединений: малое сопротивление, малый нагрев, малое усилие нажатия, стойкость к потускнению контактирующих поверхностей, низкий уровень электроконтактных шумов.

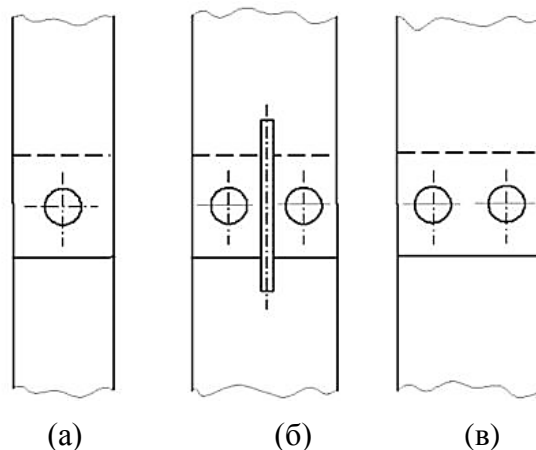


Рис. 5. Схемы болтового соединения двух плоских шинопроводов: одноболтовое соединение (а); двухболтовое соединение шин с продольным разрезом с увеличенной номинальной площадью контакта (б); аналогичное соединение шин без разреза (в)

Приведенный выше анализ факторов, влияющих на электрическое сопротивление контактных соединений, справедлив и для термического сопротивления. Такое заключение основано на электротепловой аналогии, заключающейся в том, что распространение тепла и электрического заряда описывается одинаковыми дифференциальными уравнениями. В результате аналогично закону Ома в процессе теплопереноса наблюдается пропорциональность теплового потока  $\dot{Q}$  (аналога электрического тока  $I$ ) движущей силе процесса – разности температур  $\Delta T$  (аналогу разности потенциалов  $U$  в электричестве):  $\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_T}$ , где  $R_T$  – термическое сопротивление, аналог электрического сопротивления. Одной из составляющих контактного термического сопротивления является сопротивление стягивания линий теплового тока к пятнам фактического контакта, которое также зависит от числа пятен фактического контакта и их размера.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ основных факторов, определяющих одну из двух составляющих контактного электрического или термического сопротивления – сопротивление стягивания, показал, что наиболее существенное влияние на этот параметр контактного соединения оказывает число пятен фактического контакта. Пятна фактического контакта – это ансамбль малых площадок, образовавшихся в результате совместной деформации двух контактирующих пиков шероховатости соприкасающихся поверхностей. Поэтому число и размер этих площадок зависят от параметров шероховатости контактирующих поверхностей и нормальной контактной нагрузки (номинального давления в контакте). Поскольку средний размер площадок варьируется в малых пределах, использовать эти вариации для снижения контактного сопротивления неэффективно. Увеличить число пятен фактического контакта и тем самым уменьшить сопротивление стягивания можно увеличением до известных пределов номинального контактного давления, повышением чистоты обработки поверхности (уменьшением шероховатости), уменьшением волнистости и макроотклонений контактирующих поверхностей за счет выбора оптимальной технологии их обработки. Наиболее простым и эффективным способом увеличения числа пятен фактического контакта является разделение номинальной площади контакта на

несколько независимых площадей меньшей величины. Конкретный способ реализации этого принципа зависит от конструкции контактного соединения. Примером такого способа может служить продольный разрез шинопроводов в зоне их контактирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Основы теории электрических аппаратов / под ред. П.А. Курбатова. СПб.: Лань, 2021. 592 с.
2. Electrical Contacts: Principles and Applications / ed. P.G. Slade. New York: Marcel Dekker, 1999. 1210 p.
3. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2008. 560 с.
4. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 352 с.
5. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Контакт твердых тел и его проводимость: монография. Тверь: ТГТУ, 2010. 116 с.
6. Рудзит Я.А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. Рига: Зинатне, 1975. 210 с.
7. Митюрёв А.А. Исследование характеристик галлийсодержащих материалов для скользящих электрических контактов с промежуточной жидкометаллической средой // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 4 (16). С. 17–24.
8. Митюрёв А.А. Исследование электрической проводимости промежуточной жидкометаллической среды скользящих электрических контактов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 1 (17). С. 5–10.
9. Митюрёв А.А. Некоторые закономерности применения промежуточных жидкометаллических сред в скользящих электрических контактах // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 1 (17). С. 11–18.

**Для цитирования:** Измайлов В.В., Гусев А.Ф. Проводимость контактных соединений: определяющие факторы // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 2 (22). С. 5–15.

#### CONDUCTIVITY OF CONTACT CONNECTIONS: DOMINANT FACTORS

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., A.F. GUSEV, Cand. Sc.

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: iz2v2@mail.ru

The influence of the parameters of discrete contact of technical surfaces on one of the contact resistance components – constriction resistance – is studied. The dominant factors determining the electrical and thermal conductivity of the rough surfaces contact are the number of contact areas of roughness peaks and their average size. Based on analytical and numerical (computer) models of contact joints, the influence of nominal contact pressure on these factors is analyzed. The adequacy of the analytical and numerical models to the real characteristics of the contact connection has been verified experimentally. It is shown that the real range of possible changes in the average size of the contact areas is very small, and

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 2 (22), 2024*

the dominant factor, the targeted change of which can be used to reduce the contact resistance, remains the number of contact areas of the roughness peaks. An example of such a targeted change in this contact parameter is given.

*Keywords:* contact of rough surfaces, contact area, number and size of contact areas, contact resistance, constriction resistance, roughness.

Поступила в редакцию/received: 09.01.2024; после рецензирования/revised: 24.01.2024;  
принята/accepted: 30.01.2024

УДК 621.03

## **ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ХРУПКОЕ РАЗРУШЕНИЕ ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА**

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук

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

© Болотов А.Н., 2024

Работа посвящена изучению влияния стационарного магнитного поля на квазихрупкое разрушение образцов из ферромагнитного материала – чугуна марки СЧ35. Показано, что в намагниченных образцах наблюдается анизотропный характер квазихрупкого разрушения, а величина механических напряжений, при которых происходит разрушение, несколько снижается. Доминируют трещины, которые начинают распространяться вдоль силовых линий магнитного поля. Сделано обоснованное предположение, что магнитные силы, действующие на стенки микротрещины, стимулируют ее рост при более низких механических напряжениях. Магнитные силы пропорциональны намагниченности образцов во второй степени. Максимальный эффект от действия магнитного поля проявляется в образцах, намагниченных до насыщения, и это условие определяет величину напряженности намагничивающего поля.

*Ключевые слова:* серый чугун, магнитное поле, микротрещины, квазихрупкое разрушение.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-2-15-22**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Проблема влияния внешних полей на свойства материалов давно привлекает интерес ученых, но до сих пор далека от решения [1–4]. Установлено сильное влияние магнитного поля на механические свойства немагнитных материалов, но, как отмечается, необходимы дальнейшие исследования для понимания физической сущности процессов. Было показано, что для образцов из полиэтилентерефталата наблюдается хрупкое разрушение в магнитном поле, тогда как без поля образцы растягиваются до 300...350 %; для полимеров зафиксировано снижение модуля упругости в магнитном поле примерно в 2,5 раза; показано замедление релаксационных процессов в магнитном поле. На текущий момент удалось лишь качественно объяснить наблюдаемые эффекты [1, 2].

В последние годы появляется все больше работ, посвященных влиянию стационарного магнитного поля на механические свойства ферромагнитных металлов. Повышенный интерес к этой теме объясняется возможностью управлять процессами,

протекающими на межфазных поверхностях при фрикционном взаимодействии, и оптимизировать энергозатраты при обработке материалов в магнитном поле. Присутствие постоянного магнитного поля при трении или деформации металлов не требует дополнительных источников энергии, однако способно оказывать влияние на физико-механические процессы. В научных работах [5–7] отмечается, что воздействие стационарного магнитного поля изменяет показатели прочности, пластичности и других механических и эксплуатационных свойств металла.

Влияние магнитного поля на ферромагнитные стали при комнатной температуре приводит к изменению модуля Юнга из-за магнитоупругости [6] и характера пластической деформации из-за магнитопластичности [7].

Имеется несколько противоречивых данных о влиянии сильных магнитных полей на механические свойства различных магнитных материалов. Установлено, что усталостная долговечность чистого железа снижается в насыщающем магнитном поле при комнатной температуре [8] в связи с усилением подвижности дислокаций и деформационным старением. Однако никаких дальнейших микроскопических исследований, подтверждающих это предположение, не проводилось. Предел пропорциональности стали Еврофер-97 увеличен на ~2,6 % в поперечном магнитном поле 1,5 Тл, при этом предел прочности при растяжении и относительное удлинение увеличиваются менее чем на 1 % [7]. На основании выполненных исследований в основном выделяют два механизма, относящиеся к влиянию магнитного поля на механические свойства магнитных материалов: фазовое превращение и взаимодействие между дислокациями и стенками магнитных доменов.

Отдельно стоит изучение влияния стационарных магнитных полей на разрушение магнитных материалов. Решение этой проблемы позволит повысить надежность многих технических устройств за счет рационального использования магнитных полей. Например, наиболее часто разрушение поверхностей трения деталей машин носит хрупкий или квазихрупкий характер и происходит в результате усталостного изнашивания. Такой вид изнашивания характерен для подшипников качения и скольжения, кулачковых механизмов, зубчатых передач и т.д. Кроме того, конструкция многих современных трибоузлов предполагает наличие магнитных полей [9].

Исследования влияния стационарного магнитного поля на разрушение ферромагнитных тел, проводятся давно и достаточно активно. В основном изучаются не элементарные акты разрушения или механизмы разрушения в магнитном поле, а многопараметрические процессы, в которых трудно выделить и оценить именно роль магнитного поля. Это относится к работам, в которых делаются попытки установить влияние магнитного поля, например, на износ образцов при трении, механическое диспергирование или на процессы резания в металлообработке [9–11]. Интерпретация и анализ известных из литературы результатов испытаний в магнитном поле, как правило, затруднены из-за пренебрежительного отношения к вопросам строгого контроля магнитного состояния образцов и топографии магнитного поля. Поэтому методические недостатки при выполнении опытов приводят к плохой воспроизводимости установленных данных и низкой общности полученных результатов.

Цель работы заключается в том, чтобы экспериментально установить связь между направлением вектора индукции магнитного поля в ферромагнитном материале и направлением преимущественного роста трещин при разрушении, а также оценить изменение напряжения хрупкого разрушения образцов при однородном намагничивании до состояния, близкого к магнитному насыщению.



## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Изучалось хрупкое разрушение образцов при внедрении в них шарового индентора. Поскольку при такой схеме нагружения в неограниченном пространстве создается осесимметричное поле напряжений, все направления распространения радиальных хрупких трещин равновероятны. Для того чтобы такая симметричная картина поля напряжений не искажилась при исследовании реальных образцов, их изготавливали в форме дисков диаметром 24 мм и высотой 4 мм. Материал образцов – чугун марки СЧ 35 (ГОСТ 1412-85). Образцы вырезались из массивной заготовки для исключения технологически наведенной анизотропии механических свойств. По магнитным свойствам исследуемый чугун можно отнести к магнитомягким изотропным материалам с ферромагнитной природой спонтанной намагниченности. Проведенные металлографические исследования подтвердили следующее:

- форма включений графита (ГОСТ 3443-87) пластинчатая прямолинейная;
- распределение включений неравномерное;
- площадь, занимаемая графитом, составляет 5...8 % от общей площади исследуемой поверхности шлифа;
- длина включений графита 120...250 мкм;
- металлическая основа в чугуне перлитная;
- содержание феррита 2...6 %.

Шаровой индентор диаметром 5 мм был выполнен из закаленной стали ШХ15 (ГОСТ 801-2022), имеющей существенно более высокую твердость, чем материал образцов. Индентор внедрялся в центр торцевой поверхности образцов нормальной к поверхности силой с помощью винтового пресса. Для определения величины силы, действующей на шар, использовался тарированный динамометр. Поскольку время нагружения на несколько порядков превосходит характерное время распространения упругой волны в образце, процесс нагружения можно считать близким к статическому.

Для создания в образцах однородного магнитного поля использовалась магнитная намагничивающая система (рис. 1), от которой требовалось, чтобы образец имел однородную намагниченность и радиальную текстуру. Источниками магнитного поля служили постоянные магниты 1, 2 в виде сегментов, выполненные из сплава  $\text{SmCo}_5$  марки КС-37 и имеющие радиальную намагниченность. Магнитный поток замыкается через кольцевой магнитопровод 3, изготовленный из магнитомягкой стали 10. Исследуемый образец 4 в виде шайбы помещался в зазор между постоянными магнитами.

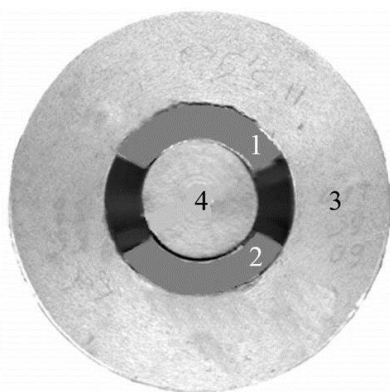


Рис. 1. Изображение магнитной системы в сборе

Для анализа топографии магнитного поля в образце использовали компьютерную программу Elcut для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов. Для тестирования программы сравнивали определенные с помощью тесламетра Ф4354 экспериментальные значения напряженности намагничивающего поля в зазоре между магнитами и рассчитанные значения. Последние отличались от экспериментальных не более чем на 7%, что свидетельствует о достаточно высоком качестве численного моделирования магнито-статического поля.

На рис. 2 показана картина силовых линий магнитного поля в образце и окружающем пространстве. Из соображений симметрии магнитного поля на рисунке приведена лишь четвертая часть магнитной системы. Как и предполагалось, векторы индукции магнитного поля в разных точках образца имеют радиальное направление и являются коллинеарными между собой.

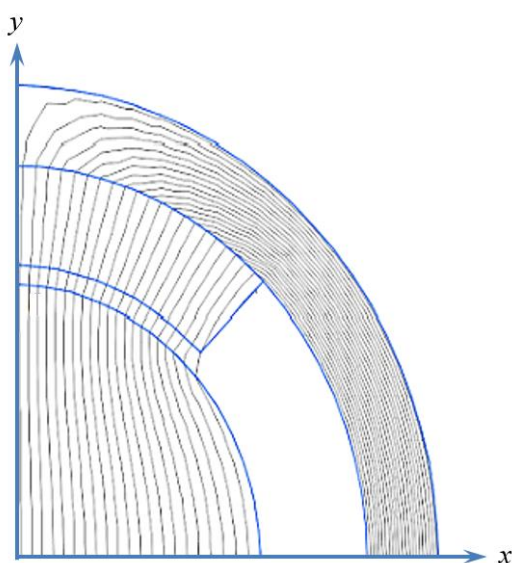


Рис. 2. Топография магнитного поля

Магнитное состояние образца (если судить по величине индукции магнитного поля) приближено к состоянию, соответствующему технической намагниченности насыщения для выбранного материала. Поэтому магнитные междоменные границы в образце присутствуют в незначительном количестве и дальнейшее намагничивание образца возможно лишь посредством вращения вектора намагниченности. Важно отметить, что намагничивание образца происходит в незамкнутой магнитной цепи, и поэтому в нем существует размагничивающее поле, пропорциональное намагниченности материала образца. Для чугуна напряженность внутреннего намагничивающего поля должна быть примерно  $2 \cdot 10^4$  А/м или чуть выше, чтобы материал находился в состоянии магнитного насыщения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При постепенном внедрении индентора в образец происходило образование радиальных трещин (рис. 3), которые быстро увеличивались по длине до краев образца, что приводило к разделению образцов на части. Наблюдались только две, три и (реже) четыре магистральных трещины, разрушающие образец.

Две трещины имели более 30 % образцов, три – 40 % и четыре менее 30 %. Количество трещин не зависело от магнитного состояния образцов. После разрушения образца на его поверхности оставалась лунка от индентора. Значит, радиальные трещины зарождались после выхода пластических деформаций материала на поверхность. Это подтверждается классическими работами по механике контактного взаимодействия [12]. Боковые трещины, которые могут образовываться при разгрузке пластически деформированного образца, в наших опытах не наблюдались.



Рис. 3. Внешний вид образцов после разрушения

На рис. 4 представлено изображение поверхности излома одного из образцов чугуна. Разрушение протекало без заметной предшествующей пластической деформации. Поверхность излома блестящая, кристаллическая. Разрушение происходило по границам зерен.



Рис. 4. Изображение поверхности излома

Контактное взаимодействие между жестким шаром и плоскостью изучалось в ряде работ, среди которых следует особо отметить монографию К. Джонсона [12]. Установлено, что пока деформируемый шаром материал находится в упругом состоянии, тангенциальные напряжения на поверхности являются растягивающими, а радиальные – сжимающими. После того как материал поверхности переходит в упругопластическое состояние, напряжения меняют знак: радиальные напряжения становятся растягивающими, а тангенциальные – сжимающими. Переход от радиального растяжения в чисто упругом состоянии к растяжению в тангенциальном направлении в упругопластическом состоянии существенно предопределяет механизм разрушения при внедрении индентора: от образования кольцевых трещин в хрупких материалах к развитию радиальных трещин в квазихрупких (полухрупких) материалах.

Характерные для хрупкого разрушения множественные кольцевые трещины, образующиеся вблизи зоны внедрения и под индентором, развиваются в систему конусных трещин, что приводит к образованию многочисленных мелких осколков. Такого явления в чистом виде в наших опытах не наблюдалось. Поэтому разрушение чугуна происходило скорее по квазихрупкому механизму, чем по хрупкому, как указывается в ряде литературных источников.

В пользу квазихрупкого разрушения образцов свидетельствует и наличие в материале под индентором одной конусообразной трещины (конус Герца) [13], которая выходит на тыльную поверхность и в отдельных случаях приводит к отделению частиц материала и образованию сквозного отверстия. Диаметр этой трещины в 2...3 раза меньше отпечатка индентора. Вероятно, эта трещина развилась из кольцевой, образовавшейся на начальной стадии нагружения. Специфических особенностей образования конических трещин в магнитном поле отмечено не было.

Исследования показали, что разрушение в магнитном поле имеет две важные взаимообусловленные особенности. В большинстве (более 85 %) образцов наблюдается распространение одной или двух радиальных трещин в направлении, близком к направлению магнитного поля. В остальных образцах радиальные трещины были расположены по нормали к силовым линиям магнитного поля. Отклонение направления распространения трещины от направления магнитного поля не превышало 10...15°.

Другая особенность разрушения образцов в магнитном поле вытекает из статистического анализа полученных значений критической силы вдавливающей индентор и инициирующей его разрушение. Критическая сила составляла  $15,4 \pm 0,9$  кН для размагниченных образцов и  $13,4 \pm 0,8$  кН для намагниченных. Значит, для зарождения и развития трещин в намагниченных образцах требуется приложить силу примерно на 10...15 % ниже.

Принято считать, что макротрещины, приводящие к разрушению, как правило, начинают развиваться из микротрещин, расположенных в образце. В основном микротрещины появляются после сдвиговых деформаций и образуются по дислокационному механизму или за счет движения границ зерен. Учитывая предысторию образцов для исследований и осесимметричный характер контактных деформаций, можно полагать, что микротрещины расположены в определенном порядке, но этот порядок не может задавать доминирующее направление распространения макротрещин. Поэтому, как и следует из опытов, в отсутствие магнитного поля все направления распространения макротрещин равновероятны. В магнитном поле картина меняется: проявляется анизотропный характер направления движения трещин. Причина, очевидно, заключается в том, что магнитное поле стимулирует развитие трещин вдоль силовых линий магнитного поля.

В работе [14] такой эффект предсказывался на основе рассмотрения теории разрушений А. Гриффитса применительно к намагниченным телам. С энергетической позиции эффект объясняется зависимостью энергии магнитного поля в объеме трещины от ее расположения, с силовой – магнитным взаимодействием между стенками трещины. В дополнение к результатам работы [14] приведем выражения для магнитного давления  $P_m$ , действующего на стенки микротрещины, растущей вдоль вектора индукции магнитного поля:

$$P_m \cong \frac{B_r^2}{2\pi\mu_0} \frac{h}{r},$$

где  $B_r$  – индукция магнитного поля в веществе;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $h, r$  – длина трещины и среднее расстояние между ее стенками. Магнитное давление на стенки трещины  $P_m$ , так же как растягивающие напряжения, способствует ее росту. Оценочные расчеты для образцов из чугуна показывают, что давление  $P_m$  в зависимости от размеров микротрещины может изменяться в диапазоне  $10^6 \dots 10^7$  Па. Следовательно, магнитное давление может составлять более 10 % от напряжений, приводящих к разрушению чугуна, и поэтому оно стимулирует преимущественный рост трещин вдоль магнитного поля.

Из приведенной формулы вытекает, что максимальное давление, способствующее раскрытию трещины, возникает в материалах, намагниченность которых близка к намагниченности технического насыщения. Поэтому напряженность внешнего намагничивающего поля с учетом формы и размеров образцов должна быть достаточной для намагничивания образцов до насыщения; дальнейшее увеличение внешнего поля не приведет к усилению его влияния на процесс разрушения.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. В намагниченных ферромагнитных материалах наблюдается анизотропный характер квазихрупкого разрушения, а величина механических напряжений, при которых оно происходит, несколько снижается. Доминируют трещины, распространяющиеся вдоль силовых линий магнитного поля. Физическая причина, приводящая к механической анизотропии материалов в магнитном поле, по-видимому, заключается в действии отталкивающих магнитных сил между стенками трещины. Этим же объясняется снижение критического напряжения разрушения в магнитном поле.

2. Полученные результаты могут найти применение для искусственного стимулирования хрупкого разрушения ферромагнитных деталей или наоборот для затруднения разрушения.

3. Установление детального механизма разрушения в магнитном поле требует дополнительных исследований с использованием более широкого круга ферромагнитных материалов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Александров П.А., Бударягин В.В., Шахов М.Н., Никанорова Н.И., Трофимчук Е.С. Механические свойства некоторых материалов в магнитном поле // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез*. 2006. № 1. С. 24–30.

2. Якушев П.Н. Деформация твердых полимеров в постоянном магнитном поле // *Физика твердого тела*. 2003. Т. 45. № 6. С. 1130–1134.

3. Афанасьева Л.Е., Кобозев И.Ю. Влияние внешнего электрического поля на глубину проплавления при лазерной сварке сталей // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 4 (12). С. 32–37.

4. Afanas'eva L.E., Barabonova I.A., Zorenko P.O., Yakovlev I.A., Grechishkin R.M., Grezev A.N., Grezev N.V. Laser Welding in External Electrical and Magnetic Fields // *Welding International*. 2013. V. 27. № 7. P. 545–547.

5. Qi K., Yang Y., Sun R., Hu G., Lu X., Li J., Xiong L. Effect of Magnetic Field on Crack Control of Co-based Alloy Laser Cladding // *Optics & Laser Technology*. 2021. V. 141. P. 107129.

6. Molotskii M.I. Theoretical Basis for Electro- and Magnetoplasticity // *Materials Science and Engineering: A*. 2000. V. 287. № 2. P. 248–258.
7. Wang Y.Q., Gorley M., Kabra S., Surrey E. Influence of a 1.5 T Magnetic Field on the Tensile Properties of Eurofer-97 Steel // *Fusion Engineering and Design*. 2019. V. 141. P. 68–72.
8. Болотов А.Н., Хренов В.Л. Триботехника магнитопассивных опор скольжения: монография. Тверь: ТГТУ, 2008. 124с.
9. Делюсто Л.Г. Основы прокатки металлов в постоянных магнитных полях. М.: Машиностроение. 2005. 272 с.
10. Малыгин Б.В., Бень А.П. Магнитное упрочнение изделий (Теория и практика). Херсон: Херсонский государственный морской институт, 2009. 352 с.
11. Болотов А.Н. Механизм фрикционного разрушения поверхностей в магнитном поле // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 2 (6). С. 14–20.
12. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 510 с.
13. Морозов Е.М., Зернин М.В. Контактные задачи механики разрушения. М.: Либроком, 2010. 544 с.
14. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Влияние магнитного поля на образование и развитие микротрещин при трении // *Известия Московского государственного технического университета МАМИ*. 2015. Т. 4. № 1 (23). С. 5–9.

**Для цитирования:** Болотов А.Н. Влияние магнитного поля на хрупкое разрушение ферромагнитного материала // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 2 (22). С. 15–22.

## INFLUENCE OF MAGNETIC FIELD ON BRITTLE DESTRUCTION OF FERROMAGNETIC MATERIAL

A.N. BOLOTOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: ac.tstu.tver@mail.ru

The work is devoted to the study of the influence of a stationary magnetic field on the quasi-brittle fracture of specimens made of a ferromagnetic material – cast iron grade SCh35. It is shown that the anisotropic nature of quasi-brittle fracture is observed in magnetized samples, and the value of mechanical stresses at which fracture occurs somewhat decreases. Cracks dominate, which begin to propagate along the magnetic field lines. A reasonable assumption is made that the magnetic forces acting on the walls of a microcrack stimulate its growth at lower mechanical stresses. The magnetic forces are proportional to the magnetization of the samples to the second power. The maximum effect of the magnetic field is manifested in samples magnetized to saturation, and this condition determines the magnitude of the magnetizing field.

*Keywords:* gray cast iron, magnetic field, microcracks, quasi-brittle fracture.

Поступила в редакцию/received: 16.01.2024; после рецензирования/ revised: 24.01.2024;  
принята/accepted: 30.01.2024

## **ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ «МАШИНА АТВУДА» ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ**

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

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

© Гусев А.Ф., Измайлов В.В., Новоселова М.В., 2024

Представлена схема и дано описание конструкции лабораторной установки для экспериментального определения коэффициента трения скольжения, собранной на основе классической машины Атвуда. Описана методика проведения измерений. Предложены формулы, позволяющие рассчитать коэффициент трения. Преимуществом представленной установки является предельно простая и самая надежная схема нагружения контакта трущихся поверхностей – гравитационная, которая обеспечивает стабильные и абсолютно точные значения как силы нормального давления на контакт, так и тангенциальной силы. Относительная приборная погрешность не превышает 0,5 %, что значительно меньше случайной погрешности, характерной для экспериментов по измерению коэффициентов трения. Рекомендуется использовать модернизированную установку и методику для создания лабораторной работы в курсах трибологии и триботехники.

*Ключевые слова:* трибология, коэффициент трения скольжения, лабораторная работа, машина Атвуда.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-2-23-29**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Специалист, занимающийся конструированием, изготовлением и эксплуатацией современного оборудования, должен обладать знаниями в области науки о трении, изнашивании и смазке. Изучение физической природы и закономерностей различных видов трения, формирование знаний о фрикционных характеристиках материалов относятся к числу основных задач трибологии, триботехники, основ трения и изнашивания и других дисциплин, включенных в учебные планы технических специальностей и направлений [1]. Значение дисциплины определено универсальным характером и ключевой ролью процессов трения и изнашивания в обеспечении надежности и долговечности современного технологического, энергетического и транспортного оборудования [2, 3].

Одна из компетенций, приобретаемых студентами при изучении трибологии, – умение проводить исследования процессов трения и изнашивания и определять фрикционные характеристики материалов и узлов, в том числе силу трения и коэффициенты трения материалов. Освоение данной компетенции происходит при выполнении лабораторного практикума, являющегося неотъемлемой частью учебного процесса. При выполнении лабораторных работ студенты должны приобретать навыки обращения с экспериментальными приборами, средствами измерения, использовать методы проведения эксперимента, оценки и представления его результатов, применять теоретические знания на практике [4].

## ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Классической установкой для изучения законов кинематики и динамики поступательного движения является машина Атвуда, обычно используемая в лабораторных работах по курсу физики в качестве прибора для изучения закономерностей равноускоренного движения и определения ускорения свободного падения [5]. Универсальность конструкции позволяет расширить область применения машины в учебном процессе, в частности, модернизировать ее для изучения закономерностей трения [6].

Нами предлагается использовать лабораторную установку, собранную на основе машины Атвуда, для экспериментального определения коэффициента трения скольжения. Схема установки приведена на рис. 1.

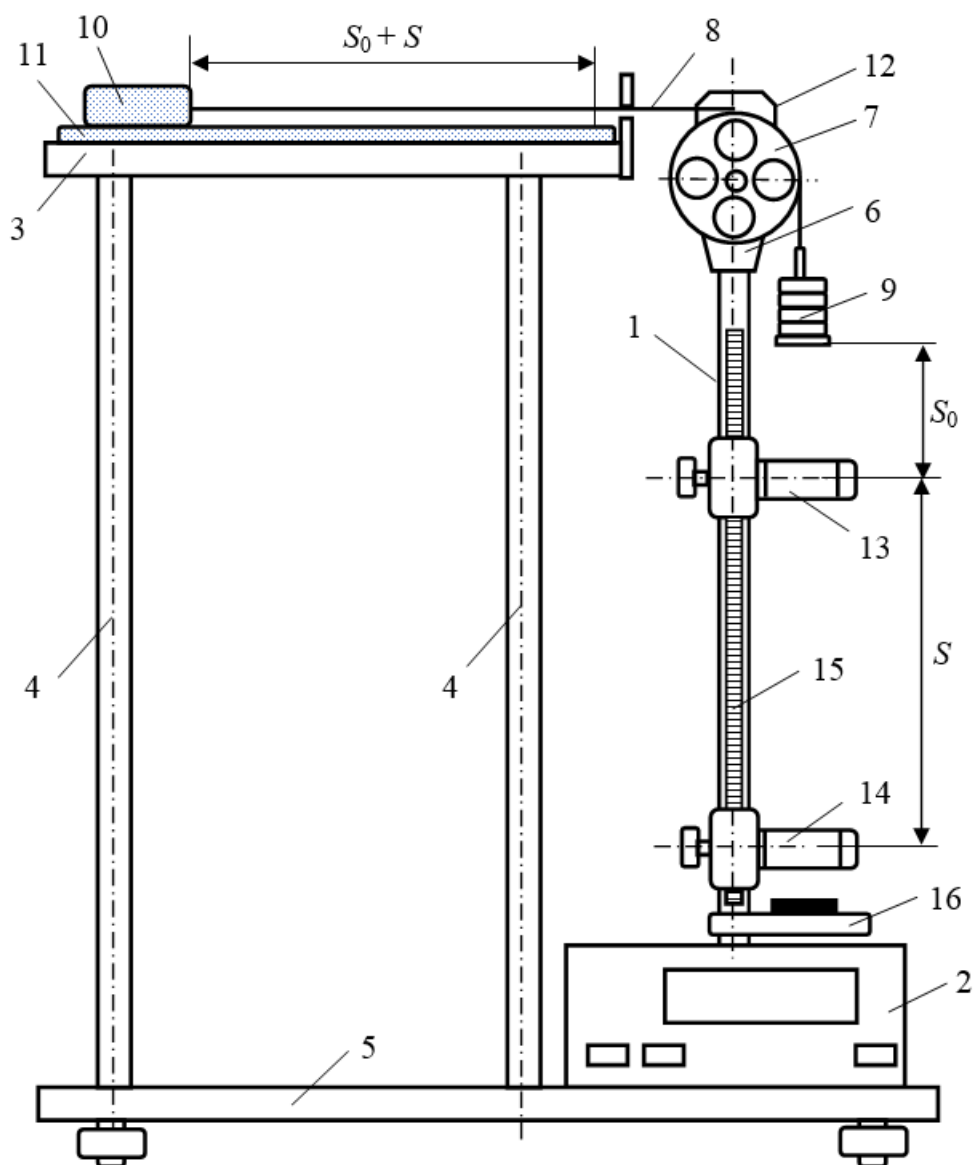


Рис. 1. Схема лабораторной экспериментальной установки



Вертикальная стойка 1, электронный блок управления с таймером (миллисекундомером с цифровой индикацией времени) 2 и горизонтальная плита 3, установленная на четырех вертикальных опорах 4, смонтированы на общем горизонтальном основании 5. На вертикальной стойке расположены четыре кронштейна. На верхнем кронштейне 6 крепится легкий блок 7, свободно вращающийся в подшипниках с малым сопротивлением. Через блок перекинута тонкая нерастяжимая нить 8, на одном конце которой подвешен груз (набор разновесов) 9. Другой конец нити подцепляется к образцу 10, выполненному в виде прямоугольного бруска. Образец может скользить по поверхности контробразца 11, имеющего вид плоской длинной пластины, закрепленной на горизонтальной плите. Коэффициент взаимного перекрытия – отношение номинальной площади контакта к площади всей дорожки трения – составляет для разных образцов примерно 0,1...0,2. Образец и контробразец образуют исследуемую пару трения. На верхнем кронштейне также установлен электромагнит 12 с фрикционной муфтой сцепления, удерживающей блок 7 от вращения, а образец от скольжения.

Для точного измерения времени движения используются вмонтированные в кронштейны фотоэлектрические датчики 13 и 14, положение которых можно изменять. На вертикальной стойке укреплен миллиметровая линейка 15, по которой определяют длину пути трения образца. Начальное положение определяют по нижнему срезу груза, а положение при прохождении заданного участка пути – по рискам на кронштейнах, совпадающим с оптическими осями фотоэлементов 13 и 14.

Нижний кронштейн 16 представляет собой площадку с резиновым амортизатором.

### **МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ**

В начале опыта груз удерживается неподвижно с помощью электромагнита в исходном положении в верхней части стойки, при этом образец находится в начальной точке пути трения (на рис. 1 – в левом крайнем положении). После нажатия клавиши «ПУСК» на электронном блоке электромагнит отключает муфту сцепления, и система «груз – образец» приходит в равноускоренное движение. При прохождении пути  $S_0$  груз пересекает оптическую ось верхнего фотодатчика 13, при этом автоматически запускается таймер и начинается отсчет времени. При пересечении грузом оптической оси нижнего фотодатчика 14 секундомер автоматически останавливается, и время  $t$  прохождения пути  $S$  между двумя фотодатчиками высвечивается на цифровом индикаторе.

В самом начале первого участка пути  $S_0$  происходит переход от трения покоя к трению скольжения, характеризующийся нестабильностью силы трения. Это может вызвать разное время задержки при старте образца и повлиять на время прохождения пути  $S_0$ , но практически не влияет на скорость  $v_0$ , которую приобретает образец к концу этого участка. Поэтому измерение времени движения проводят на втором участке пути  $S$ , где наблюдается уже установившееся скольжение с практически постоянным значением силы трения.

### **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ**

Для нахождения коэффициента трения рассмотрим динамику ускоренного движения системы грузов (рис. 2): образца 1, скользящего с трением по горизонтальной плоскости, и груза 2, движущегося вертикально вниз.

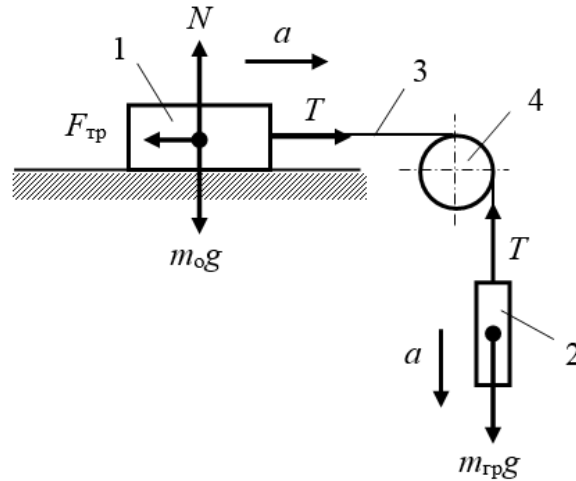


Рис. 2. Схема для расчета ускорения  $a$

В данном случае схема для расчета ускорения фактически представляет из себя задачу, решение которой хорошо известно из курса общей физики. На рис. 2 изображены силы, действующие на систему:  $m_0 g$  и  $m_1 g$  – силы тяжести, действующие на образец массой  $m_0$  и груз массой  $m_1$ ;  $N$  – сила нормального давления;  $F_{\text{тр}}$  – сила трения скольжения;  $T$  – сила натяжения нити. Так как нить 3 нерастяжима, то образец и груз движутся с одинаковыми по модулю ускорениями и скоростями, и за одно и то же время проходят равные отрезки пути. В данной установке масса образца и масса груза на порядок больше массы легкого блока 4, поэтому моментом инерции блока можно пренебречь. Масса нити также пренебрежимо мала. Силы трения в подшипниках блока можно не учитывать, так как они незначительны по сравнению с силой трения скольжения образца. В этом случае силу натяжения нити  $T$  можно считать одинаковой по всей ее длине.

Применив основной закон динамики поступательного движения, запишем уравнения для проекций сил и ускорений на горизонтальную и вертикальную оси координат (см. рис. 2):

$$m_1 g - T = m_1 a, \quad (1)$$

$$T - F_{\text{тр}} = m_0 a, \quad (2)$$

$$N - m_0 g = 0. \quad (3)$$

Сила трения скольжения согласно закону Амонтона определяется по формуле

$$F_{\text{тр}} = fN, \quad (4)$$

где  $f$  – коэффициент трения скольжения.

Решая совместно систему уравнений (1)–(4), выразим искомый коэффициент трения:

$$f = \frac{m_1}{m_0} - \left( \frac{m_1}{m_0} + 1 \right) \frac{a}{g}. \quad (5)$$

Так как типичное значение коэффициента трения скольжения твердых тел при сухом трении составляет  $f \approx 0,25 \dots 0,35$  [7], рекомендуется провести серию измерений при разных соотношениях масс:

$$\frac{m_{\text{гр}}}{m_0} \approx 0,3 \dots 0,5.$$

Для нахождения величины ускорения  $a$ , входящей в уравнение (5), необходимо записать кинематические уравнения движения груза (см. рис. 1).

На участке пути  $S_0$  груз (и образец) при движении из состояния покоя с ускорением  $a$  к концу участка разгоняются до скорости  $v_0$ :

$$S_0 = \frac{v_0^2}{2a}. \quad (6)$$

Второй участок пути  $S$  груз, двигаясь равноускорено с ускорением  $a$  и начальной скоростью  $v_0$ , проходит за время  $t$ :

$$S = v_0 t + \frac{at^2}{2}. \quad (7)$$

Объединив уравнения (6) и (7) и решив полученное квадратное уравнение относительно ускорения, получим:

$$a_{1,2} = \frac{4S}{t^2} \left[ \left( \frac{S_0}{S} + \frac{1}{2} \right) \pm \sqrt{\left( \frac{S_0}{S} \right)^2 + \frac{S_0}{S}} \right]. \quad (8)$$

В данном случае физический смысл имеет только знак «минус» перед радикалом, иначе  $a > g$ .

Если задать отношение  $S_0/S = 0,5625$ , то выражение (8) значительно упрощается и принимает вид

$$a = \frac{S}{2t^2}. \quad (9)$$

Для данной установки рекомендуется разделить всю длину пути на два неравных участка  $S_0 = 13,5$  см и  $S = 24$  см (см. рис. 1). В этом случае для нахождения ускорения необходимо будет экспериментально определить только время  $t$ , за которое груз проходит путь  $S$ .

Рассчитав ускорение по формуле (9), значение коэффициента трения скольжения можно будет вычислить по формуле (5).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Очевидным преимуществом представленной установки является предельно простая и наиболее надежная схема нагружения контакта трущихся поверхностей –

гравитационная, которая обеспечивает стабильные и абсолютно точные значения как силы нормального давления на контакт, так и тангенциальной силы. Сдвигающее усилие создается набором разновесов, не зависит ни от каких посторонних факторов и может изменяться в широком интервале. Сила нормального давления определяется весом образца, и ее также можно при необходимости увеличить, разместив на образце дополнительные грузы.

К достоинствам установки относятся использование очень точного оптоэлектронного метода измерения времени (до 0,001 с) и высокая точность определения всех других величин, входящих в формулы для расчета коэффициента трения: пути, массы образцов и массы грузов. Во всех случаях относительная приборная погрешность не превышает 0,5 %. Это значительно меньше случайной погрешности, характерной для экспериментов по измерению коэффициентов трения. Определенным недостатком метода можно считать непостоянство скорости скольжения образца на длине пути  $S$ .

Описанная установка и методика экспериментального определения коэффициента трения скольжения могут применяться для создания лабораторной работы в курсах «Трибология», «Триботехника» и др.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хаджиев А.А., Мадаева М.З., Саидов М.А., Шуаипов А.А. О целесообразности преподавания в вузах, для общеинженерной подготовки студентов, дисциплин «Трибология» и «Триботехника». *Актуальные вопросы в науке и практике: Сборник статей по материалам VII Международной научно-практической конференции*. В 2-х ч. Уфа: ООО «Дендра», 2018. Ч. 1 (2). С. 161–164.
2. Доценко А.И., Буяновский И.А. Основы триботехники: учебник. М.: НИЦ Инфра-М, 2020. 336 с.
3. Хопин П.Н., Шишкин С.В. Трибология: учебник для вузов. М.: Юрайт, 2021. 236 с.
4. Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник. М.: Машиностроение, 2008. 384 с.
5. Лабораторные занятия по физике / под ред. Л.Л. Гольдина. М.: Наука, 1983. 704 с.
6. Чебодаева А.Б., Чебодаев М.И. Экспериментальное исследование момента сил трения на оси блока с помощью машины Атвуда // *Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки*. 2023. Т. 1. № 1. С. 71–79.
7. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебник для технических вузов / под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.

**Для цитирования:** Гусев А.Ф., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Возможности модернизированной лабораторной установки «Машина Атвуда» для исследования трения скольжения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 2 (22). С. 22–29.

## THE POTENTIAL OF THE MODERNIZED LABORATORY INSTALLATION “ATWOOD MACHINE” FOR STUDYING SLIDING FRICTION

A.F. GUSEV, Cand. Sc., V.V. IZMAILOV, Dr. Sc.,  
M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: iz2v2@mail.ru

A diagram is presented and a description of the design of a laboratory installation for the experimental determination of the sliding friction coefficient, assembled on the basis of the classical Atwood machine, is given. The measurement technique is described and formulas are proposed to calculate the friction coefficient. The advantage of the presented installation is the extremely simple and most reliable loading scheme for the contact of rubbing surfaces - gravitational, which provides stable and absolutely accurate values of both the normal pressure force on the contact and the tangential force. The relative instrumental error does not exceed 0.5 %, which is significantly less than the random error characteristic of experiments measuring friction coefficients. It is recommended to use a modernized setup and methodology to create laboratory work in tribology and triboengineering courses.

*Keywords:* tribology, sliding friction coefficient, laboratory work, Atwood machine.

Поступила в редакцию/received: 13.02.2024; после рецензирования/revised: 22.02.2024;  
принята/accepted: 29.02.2024

УДК 621.791.92

## ПОРОШКОВАЯ ЛАЗЕРНАЯ НАПЛАВКА БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук, И.А. СМОЛЯКОВА, канд. техн. наук

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

© Афанасьева Л.Е., Смолякова И.А., 2024

Представлены результаты металлографического анализа быстрорежущей стали Р6М5, полученной порошковой наплавкой на автоматизированном комплексе ЦЛТ-Ю-5 с многоканальным (48 лучей) CO<sub>2</sub> лазером. Показано, что фазовый состав стали – мартенсит, 10 % остаточного аустенита и 2 % карбидов V<sub>2</sub>C. Микротвердость наплавленного металла составляет 8 500...9 000 МПа. Результаты проведенных исследований могут быть полезны производителям биметаллического инструмента с рабочей частью из наплавленной быстрорежущей стали.

*Ключевые слова:* быстрорежущая сталь, лазерная наплавка, многоканальный CO<sub>2</sub> лазер.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-2-29-35**

### ВВЕДЕНИЕ

В промышленности применяются различные способы наплавки: электродуговая, лазерная, плазменная, газовая, токами высокой частоты и др. К преимуществам лазерной наплавки относятся небольшая зона термического влияния, отсутствие

термических поводов, минимальное перемешивание основного и наплавляемого материала; поверхность после наплавки перекрывающимися валиками почти плоская и требует незначительной последующей механической обработки [1–4]. Лазерную наплавку применяют во многих отраслях, в том числе в аэрокосмической, автомобильной, судовой, нефтегазовой, транспортной, энергетической промышленности [5].

Процесс лазерной наплавки сложен, и на качество наплавленного металла влияет множество факторов. В работах [6, 7] показано, что технология лазерной наплавки включает более 19 параметров. Одним из критических, влияющих на формирование наплавленного покрытия, является технологический параметр. Наибольшее влияние на качество наплавленного слоя оказывают мощность лазерного излучения, скорость сканирования луча и скорость подачи порошка. Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования показывают, что правильный выбор технологических параметров позволяет значительно улучшить свойства нанесенного слоя [2–7].

Линия сплавления при лазерной наплавке имеет характерный профиль, повторяющий распределение плотности мощности лазерного излучения по сечению дорожки [1]. По мере приближения к поверхности подложки наблюдается частичное перемешивание материала наплавки и подложки. Для формирования наплавленных слоев с малым коэффициентом перемешивания (0,05...0,15) в результате незначительного проплавления основы важную роль играет степень однородности интегрального тепловложения по ширине дорожки. В связи с этим перспективно использование для наплавки многоканальных лазеров с оптимизированным распределением плотности мощности в пятне [8–10].

Цель настоящей работы состоит в исследовании особенностей формирования микроструктуры и фазового состава быстрорежущей стали Р6М5, наплавленной с помощью многоканального CO<sub>2</sub> лазера.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Порошковая лазерная наплавка осуществлялась на комплексе модели ЦЛТ-Ю-5 с применением непрерывного излучения многоканального (48 лучей) CO<sub>2</sub> лазера. Однородность тепловложения по ширине зоны обработки обеспечивалась за счет специально разработанного доктором технических наук В.И. Юговым с соавторами лазерного излучателя с трубками, скомпонованными в виде пакета, состоящего из расположенных один внутри другого четырех восьмигранников [11]. Одноваликовую наплавку образцов выполняли двухступенчатым методом. Стальной порошок предварительно насыпали на поверхность подложки и с помощью трафарета выравнивали по толщине, равной 1 мм. Затем проводили его плавление лазерным излучением на различных технологических параметрах. Мощность излучения изменяли в пределах 3...4 кВт, скорость сканирования луча – в диапазоне 3...10 мм/с. Диаметр пятна лазерного излучения не изменялся и был равен 8 мм.

В качестве присадочного материала использовали порошок быстрорежущей стали марки М2 (аналог Р6М5 ГОСТ 19265-73), полученный методом газоструйного распыления расплава. Химический состав порошка по данным производителя представлен в табл. 1. На рис. 1 изображены частицы порошка, средний размер частиц ~100 мкм. Порошки, полученные методом газоструйного распыления расплава, как правило, имеют гранулометрический состав, изменяющийся в широких пределах. На поверхности отдельных частиц встречаются сателлиты, что может влиять на насыпную плотность. Кроме того, внутри частиц нередко встречаются пустоты, заполненные аргоном. Во время наплавки не все пузырьки газа успевают выйти из расплава, что может привести к пористости наплавленного металла.

Таблица 1. Химический состав порошка быстрорежущей стали (% масс.)

C	W	V	Mo	Cr	Mn	Si	Fe
1,0	6,2	2,0	5,0	4,0	0,3	0,3	Основа

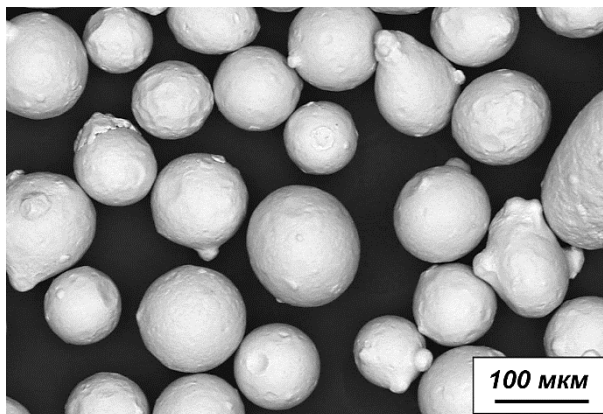


Рис. 1. Изображение частиц порошка быстрорежущей стали

В качестве материала подложки использовали заготовки из среднеуглеродистой низколегированной стали 30ХГСА (ГОСТ 4543-71), предварительно упрочненной закалкой от температуры 880 °С в масле и отпуском при температуре 200 °С в течение одного часа.

Микроструктуру стали изучали с помощью растрового электронного микроскопа. Микроструктуру выявляли химическим травлением шлифов 3%-м раствором азотной кислоты. Для проведения рентгеноспектрального микроанализа использовали энергодисперсионный спектрометр. Фазовый состав определяли методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре в  $\text{Co K}\alpha$ -излучении. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В зависимости от технологических параметров получены разные по типу валики наплавленного металла (рис. 2 и табл. 2). Образец № 1 представляет собой изолированные капли присадочного материала на поверхности подложки. Стальная подложка не успевает расплавиться под слоем порошка и не смачивается расплавленной присадкой, т.е. режим наплавки № 1 соответствует области капельного формирования.

При снижении скорости сканирования луча с 10 до 7 мм/с (образец № 2) формируется неравномерный валик. Режим наплавки также не является оптимальным. Дальнейшее снижение скорости сканирования луча, а также мощности лазерного излучения (образцы № 3–6) приводит к формированию равномерных валиков наплавленного металла. Эти образцы исследовали более детально.

Микроструктура наплавленной быстрорежущей стали вблизи линии сплавления с конструкционной сталью 30ХГСА представлена на рис. 3а. Проплавление основного металла у биметаллических образцов минимально, коэффициент перемешивания  $\gamma$  наплавленного металла и основы близок к 0 %, что показывает высокую степень однородности интегрального тепловложения по сечению дорожки, т.е. выбор режимов наплавки оптимален.

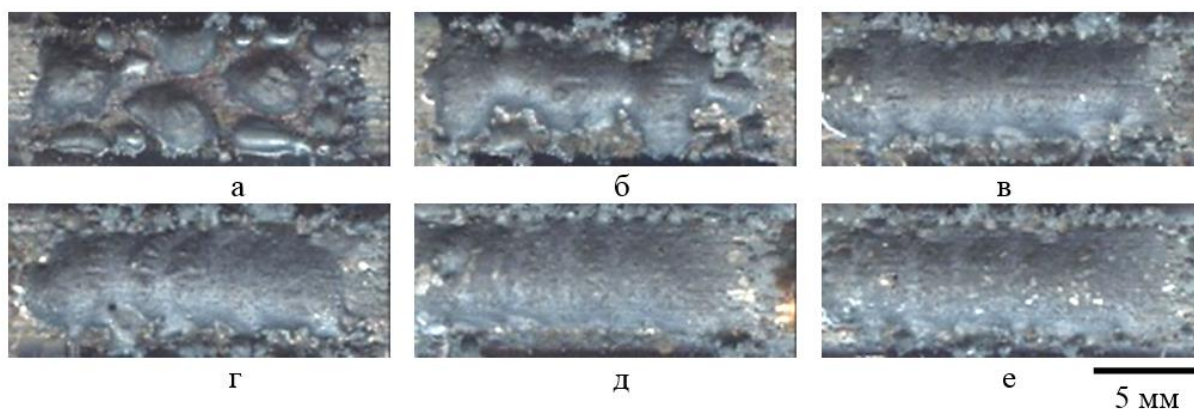


Рис. 2. Изображение наплавленных образцов. Вид сверху:  
 № 1 (а); № 2 (б); № 3 (в); № 4 (г); № 5 (д); № 6 (е)

Таблица 2. Характеристики наплавленных образцов

№ образца	Мощность излучения, кВт	Скорость сканирования луча, мм/с	Особенности процесса
1	4	10	Капельное формирование
2	4	7	Неравномерный валик
3	4	5	Равномерный валик
4	3,5	5	
5	3,5	3	
6	3	3	

Данные металлографического анализа подтверждаются рентгеноспектральным микроанализом наплавленных образцов, результаты которого представлены на рис. 3б и в табл. 3. Прямоугольниками обозначены зоны микроанализа. Спектры 1 и 2 показывают химический состав стали 30ХГСА вблизи линии сплавления, спектры 3...5 дают распределение легирующих компонентов в наплавленной быстрорежущей стали по высоте валика. Химический состав наплавленного металла вблизи линии сплавления (спектр 3) и в других частях валика одинаков.

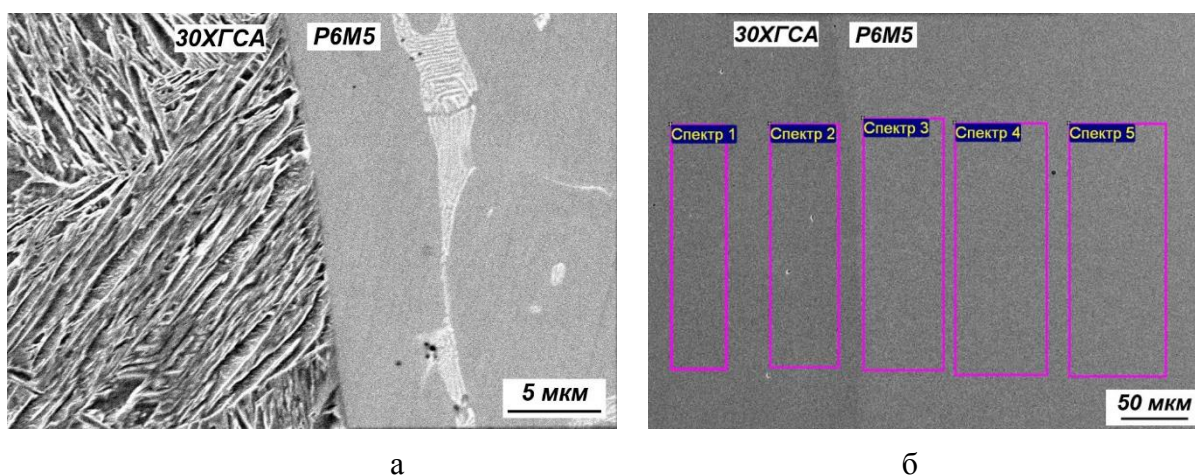


Рис. 3. Микроструктура наплавленной быстрорежущей стали вблизи линии сплавления (а) и электронно-микроскопический снимок зон рентгеноспектрального микроанализа (б)



Таблица 3. Распределение легирующих компонентов в наплавленном биметаллическом образце по спектрам (% масс.)

№ спектра	Si	V	Cr	Mn	Mo	W
1	1,25	–	1,05	1,04	–	–
2	1,25	–	0,99	0,89	–	–
3	–	2,01	4,32	–	5,92	5,40
4	–	2,03	4,33	–	5,75	5,54
5	–	1,93	4,40	–	5,63	5,78

При лазерной наплавке порошка быстрорежущей стали формируется слой с низким содержанием пор. Среднее количество пор по объему наплавленного металла составляет  $0,315 \pm 0,001$  % (рис. 4а), средний размер пор около 0,5 мкм. Микротвердость наплавленного металла 8 500...9 000 МПа (рис. 4б). Точками показаны измеренные значения, линией – аппроксимация экспериментальных данных по функции Больцмана с использованием компьютерной программы Origin.

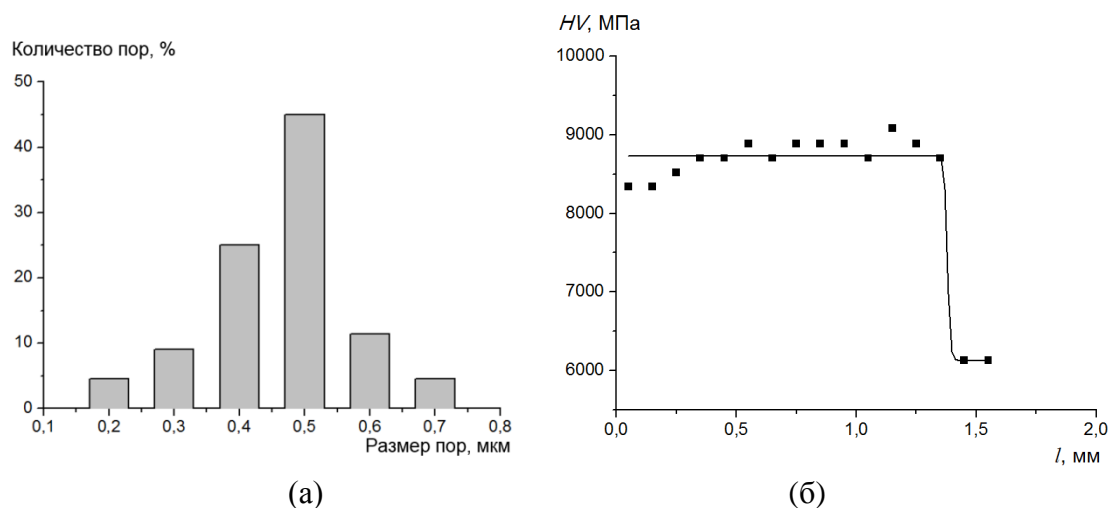


Рис. 4. Распределение пор в наплавленном металле по размеру (а) и изменение микротвердости быстрорежущей стали по высоте наплавленного валика (б)

Результаты фазового рентгеноструктурного анализа представлены на рис. 5. На дифрактограмме зарегистрированы отражения от  $\alpha$ - и  $\gamma$ -твердых растворов, количество карбидов незначительно. Зарегистрирована одна линия карбидных фаз – пик, соответствующий межплоскостному расстоянию 2,2497 Å. Эта линия, скорее всего, является отражением от карбида  $V_2C$  с гексагональной кристаллической решеткой. Очевидно, что при лазерной наплавке растворились почти все тугоплавкие карбиды, по оценочным расчетам в наплавленном металле содержится порядка 10 % остаточного аустенита, 2 % карбида  $V_2C$  и мартенсит.

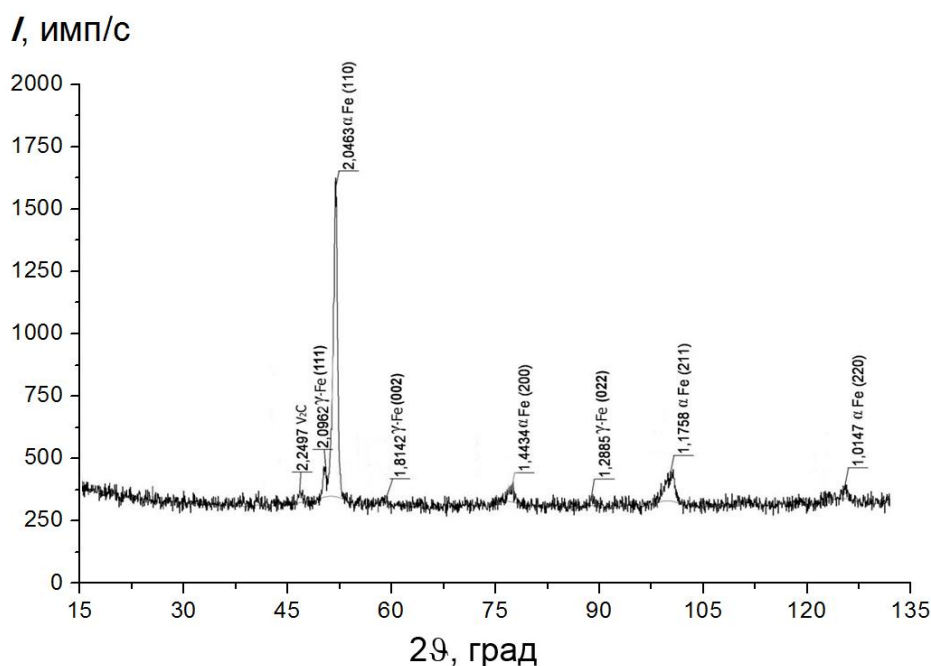


Рис. 5. Дифрактограмма образца быстрорежущей стали

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом порошковой лазерной наплавки получены биметаллические образцы быстрорежущей стали марки М2 (Р6М5) на конструкционной стали при различных режимах. Микротвердость наплавленного металла составляет 8 500...9 000 МПа. Фазовый состав быстрорежущей стали – мартенсит, 10 % остаточного аустенита и 2 % карбидов  $V_2C$ . Выявлены мелкие равномерно распределенные микропоры со средним размером 0,5 мкм. Возможной причиной их образования являются особенности строения порошка для наплавки, полученного по технологии газоструйного распыления расплава.

Порошковая наплавка многоканальных  $CO_2$  лазеров обеспечивает высокую степень однородности интегрального тепловложения по сечению дорожки и может использоваться для изготовления высокопроизводительного биметаллического инструмента в целях экономии высоколегированных сталей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 663 с.
2. Wang K., Liu W., Hong Y., Sohan H.S., Tong Y., Hu Y., Ju J. An Overview of Technological Parameter Optimization in the Case of Laser Cladding // *Coatings*. 2023. V. 13. № 3. P. 496.
3. Liu Y., Ding Y., Yang L., Sun R., Zhang T., Yang X. Research and Progress of Laser Cladding on Engineering Alloys: A review // *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. V. 66. P. 341–363.
4. Zhu L., Xue P., Lan Q., Meng G., Ren Y., Yang Z., Liu Z. Recent Research and Development Status of Laser Cladding: A review // *Optics & Laser Technology*. 2021. V. 138. P. 106915.

5. Биргер Е.М., Москвитин Г.В., Поляков А.Н., Архипов В.Е. Промышленная лазерная наплавка: современное состояние и тенденции // *Сварочное производство*. 2009. № 9. С. 32–42.
6. Zhu L., Wang S., Pan H., Yuan C., Chen X. Research on Remanufacturing Strategy for 45 Steel Gear Using H13 Steel Powder Based on Laser Cladding Technology // *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. V. 49. P. 344–354.
7. Muvvala G., Karmakar D. P., Nath A. K. Online Monitoring of Thermo-cycles and its Correlation with Microstructure in Laser Cladding of Nickel Based Super Alloy // *Optics and Lasers in Engineering*. 2017. V. 88. P. 139–152.
8. Югов В.И., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В. Особенности формирования структуры и микрогеометрии поверхности лазерных наплавки с использованием многоканального CO<sub>2</sub>-лазера // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2016. № 11 (143). С. 19–22.
9. Афанасьева Л.Е., Сахаров К.А. Порошковая лазерная наплавка с помощью многоканального лазера // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2023. Т. 19. № 9 (225). С. 400–404.
10. Афанасьева Л.Е., Сахаров К.А. Порошковая лазерная наплавка износостойкого композиционного покрытия // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 1 (21). С. 21–26.
11. Патент РФ 2580350 *Устройство для упрочнения поверхности детали* / Югов В.И. и др.; Заявл. 05.11.2014. Опубл. 10.04.2016. Бюл. № 10.

**Для цитирования:** Афанасьева Л.Е., Смолякова И.А. Порошковая лазерная наплавка быстрорежущей стали // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 2 (22). С. 29–35.

## **POWDER LASER CLADDING OF HIGH-SPEED STEEL**

L.E. AFANASIEVA, Cand. Sc., I.A. SMOLYAKOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: ludmila.a@mail.ru

The results of metallographic analysis of high-speed steel R6M5 obtained by powder cladding on an automated complex CLT-Yu-5 with multichannel (48 beams) CO<sub>2</sub> laser are presented. It is shown that the phase composition of steel is martensite, 10 % of residual austenite and 2 % of V<sub>2</sub>C carbides. The microhardness of the deposited metal is 8500..9000 MPa. The results of the conducted research may be useful to manufacturers of bimetallic tools with a working part made of fused high-speed steel.

*Keywords:* high-speed steel, laser cladding, multi-channel CO<sub>2</sub> laser.

Поступила в редакцию/received: 15.02.2024; после рецензирования/revise: 22.02.2024;  
принята/accepted: 27.02.2024

## О НЕКОТОРЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СООТНОШЕНИЯХ, СВЯЗАННЫХ С ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ИЗНАШИВАНИЯ

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук

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

© Измайлов В.В., 2024

Рассмотрены корреляционные соотношения, описывающие зависимость линейной интенсивности изнашивания фрикционного контакта от коэффициента трения и твердости материалов компонентов пары трения. Соотношения получены статистической обработкой экспериментальных данных, относящихся к паре трения «щетка – коллектор». Установлена сильная корреляционная связь линейной интенсивности изнашивания компонентов пары трения с коэффициентом трения, а также обнаружена сильная положительная корреляция линейной интенсивности изнашивания с твердостью материалов щетки и коллектора, что противоречит известным результатам, свидетельствующим о возрастании износостойкости с увеличением твердости трущихся деталей. Приводится наиболее вероятное объяснение такого противоречия. Кроме того, указанная зависимость носит немонотонный характер с заметным возрастанием скорости изнашивания, если твердость материала щетки становится сравнимой с твердостью материала коллектора.

*Ключевые слова:* трение, коэффициент трения, линейная интенсивность изнашивания, твердость, корреляционные связи.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-2-36-43**

### ВВЕДЕНИЕ

Процесс изнашивания при трении относится к случайным нестационарным процессам. Его случайный характер обусловлен влиянием на него многочисленных факторов, многие из которых сами по себе являются случайными величинами. Эти факторы можно условно разделить на внешние и внутренние. К числу первых относятся нагрузка на фрикционный контакт, скорость скольжения, параметры внешней среды, наличие или отсутствие смазочного материала и др. [1]. Основными внутренними факторами являются физико-механические свойства материалов контактирующих деталей, характеристики смазочного материала (при его наличии) и шероховатость поверхностей трения. В скользящих электрических контактах наряду с механическим изнашиванием происходит электроэрозионное изнашивание. К факторам, влияющим на этот вид изнашивания, относят плотность тока и коммутируемое напряжение [2].

Учесть комплексное влияние многочисленных факторов на интенсивность механического изнашивания  $I_h$  Ю.Н. Дроздов [3] предложил с помощью критериальных зависимостей

$$I_h = I_h(\Phi_a, \Phi_{см}, \Phi_y, \Phi_{ш}), \quad (1)$$

где  $\Phi$  – безразмерные комплексы величин (критерии), которые влияют на характеристики изнашивания:  $\Phi_a$  – критерий нагруженности контакта;  $\Phi_{см}$  – критерий смазочной способности;  $\Phi_y$  – критерий усталостной прочности;  $\Phi_{ш}$  – критерий шероховатости. Одним из основных является критерий нагруженности контакта:

$$\Phi_a = \frac{p_n}{H}, \text{ или } \Phi_a = \frac{fp_n}{H}.$$

Таким образом, можно ожидать зависимость интенсивности изнашивания от номинального контактного давления  $p_n = N / A_n$  (или от нормальной нагрузки  $N$ , так как в большинстве случаев номинальная площадь контакта  $A_n = \text{const}$ ), коэффициента трения  $f$  и твердости (микротвердости)  $H$  материалов трущихся тел. Целью данной работы являлось установление степени влияния перечисленных факторов на интенсивность изнашивания деталей скользящего контакта «щетка – коллектор» и определение характера этого влияния.

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Если ограничиться рассмотрением влияния на интенсивность изнашивания только первого, основного критерия – нагруженности контакта, включив остальные в коэффициент износа  $K$ , то уравнение (1) можно записать в виде

$$I_h = K \left( \frac{p_n}{H} \right)^m \quad (2)$$

или в виде

$$I_h = K \left( \frac{fp_n}{H} \right)^m. \quad (3)$$

При  $m = 1$  уравнение (2) превращается по существу в известное уравнение Хольма – Арчарда [4] для количественной характеристики величины износа при трении.

При выборе методики экспериментов и дальнейшем анализе их результатов необходимо учитывать специфику исследуемых пар трения. В качестве объекта исследования в данном случае были выбраны пары трения, имитирующие скользящий электрический контакт «щетка – коллектор». Специфика таких пар трения заключается, во-первых, в ограниченном выборе материалов трущихся деталей – щетки и коллектора. Поскольку для снижения потерь энергии в электрическом контакте желательно минимальное контактное электросопротивление, материалы контактных деталей должны иметь хорошую электрическую проводимость. Первым претендентом на роль контактного материала по критерию проводимости выступает серебро, а из недорогих металлов – медь. Однако фрикционные характеристики меди отнюдь не высоки. Для их улучшения используют композиции на основе меди с добавлением антифрикционных компонентов – твердосмазочных материалов. Это может быть графит, дисульфид молибдена и другие аналогичные по строению кристаллические материалы, а также легкоплавкие металлы.

Во-вторых, специфика электроконтактных пар трения «щетка – коллектор» состоит в том, что за редким исключением они работают в режиме трения без смазочного материала (сухое трение).

## ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились на установке для исследования фрикционных и электрических характеристик материалов щеточно-коллекторного узла [5]. Коллектор изготовлен из меди, щетки – из композиционных материалов на основе меди с добавлением антифрикционных компонентов, как указано выше.

Базовый уровень режимов испытаний следующий:

номинальное контактное давление  $p_n = 70$  кПа;

линейная скорость скольжения в контакте  $V = 5$  м/с;

плотность тока  $j = 0,1$  А/мм<sup>2</sup>.

Трение происходило в отсутствие смазочного материала. Перед началом испытаний контакт прирабатывался в течение 10 часов.

Микротвердость материалов измерялась в соответствии с ГОСТ 9450-76 на приборе ПМТ-3. Линейный износ щеток  $h_{щ}$  определялся под микроскопом по изменению размера щетки в направлении, перпендикулярном поверхности трения, линейный износ коллектора  $h_k$  – по профилограмме поверхности трения вдоль образующей цилиндрического коллектора. Путь трения  $L$  вычислялся по известной скорости скольжения и длительности испытаний. Характеристиками величины износа служили линейные интенсивности изнашивания щетки  $I_{щ} = h_{щ} / L$  и коллектора  $I_k = h_k / L$ .

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде всего, представляет интерес оценить наличие корреляционной связи интенсивности изнашивания щетки и коллектора. Как видно из рис. 1, линейные интенсивности изнашивания щетки и коллектора явно коррелированы. Степень корреляции оценивали с помощью непараметрических методов статистики по величине коэффициентов ранговой корреляции Спирмена  $\rho$  и Кендалла  $\tau$  [6], которые не требуют исключительно линейной связи между исследуемыми переменными и нормального распределения их числовых значений. Полученные значения  $\rho = 0,85$  и  $\tau = 0,72$  статистически значимы на уровне  $p < 0,01$ . Такие коэффициенты соответствуют высокой степени корреляции случайных величин, в данном случае интенсивностей изнашивания щетки и коллектора.

Абсолютные значения линейной интенсивности изнашивания щетки существенно меньше соответствующих величин для коллектора, что вполне ожидаемо из-за гораздо меньшей площади поверхности трения щетки по сравнению с коллектором.

Связь линейной интенсивности изнашивания щетки и коллектора с величиной коэффициента трения представлена на рис. 2. Наблюдаемая зависимость  $I_h(f)$  – существенно нелинейная, с ростом коэффициента трения интенсивность изнашивания возрастает по степенному закону. Проверка тесноты взаимосвязи интенсивности изнашивания и коэффициента трения показала очень высокую степень корреляции этих параметров для коллектора и чуть менее высокую – для щетки. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена  $\rho = 0,90$  для переменных  $I_k$  и  $f$ ;  $\rho = 0,80$  для переменных  $I_{щ}$  и  $f$ . Коэффициент корреляции Кендалла, как обычно, несколько меньше:  $\tau = 0,78$  для переменных  $I_k$  и  $f$  и  $\tau = 0,64$  для переменных  $I_{щ}$  и  $f$ .

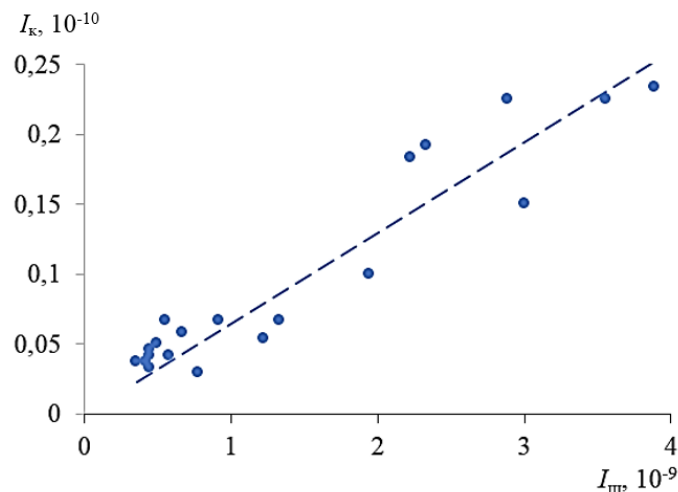


Рис. 1. Корреляция линейных интенсивностей изнашивания щетки и коллектора:  
 точки – экспериментальные значения;  
 пунктир – аппроксимирующая зависимость

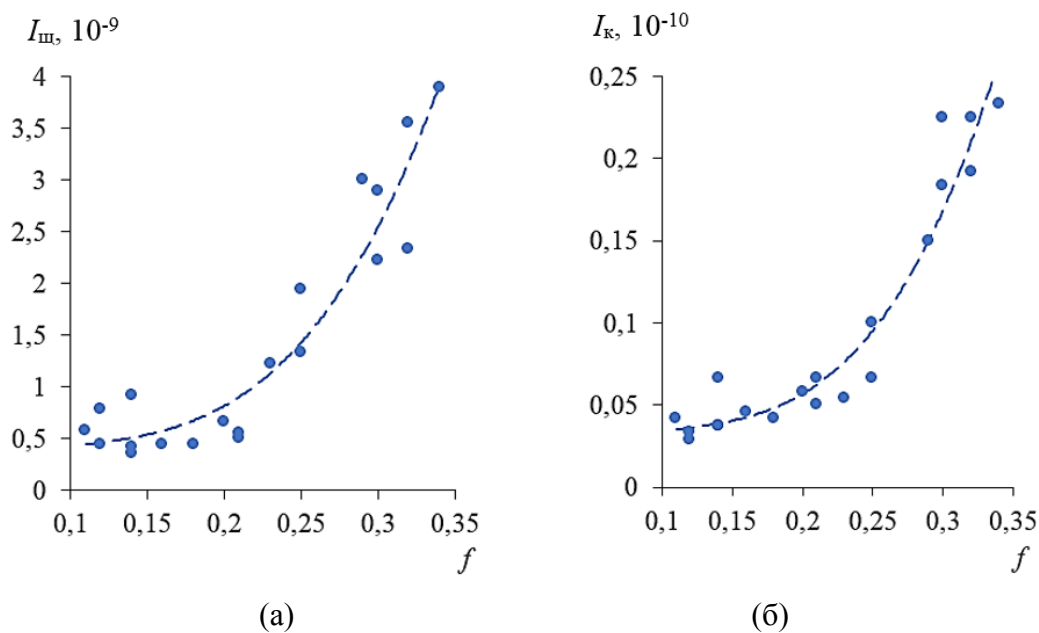


Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания щетки (а) и коллектора (б) от коэффициента трения: точки – экспериментальные результаты;  
 пунктир – аппроксимирующая зависимость

Уравнения (2) и (3) свидетельствуют о том, что интенсивность механического изнашивания зависит, помимо коэффициента трения, от твердости изнашиваемого материала. В трибологии хорошо известны исследования М.М. Хрущева, подтверждающие линейную зависимость относительной износостойкости металлов от их твердости [7]. В уравнении Арчарда твердость выступает как верхняя оценка величины фактического контактного давления. Кроме того, существуют хорошо проверенные теоретические и эмпирические зависимости, однозначно связывающие твердость с прочностными характеристиками материала.

Экспериментальные результаты, представленные на рис. 3, на первый взгляд противоречат закономерностям (2) и (3): интенсивность изнашивания как щетки, так и коллектора возрастает при увеличении микротвердости материала щетки.

Зависимость интенсивности изнашивания щетки от твердости материала, из которого она изготовлена, может быть выражена линейным уравнением регрессии (пунктир на рис. 3а), которое статистически значимо на уровне  $p < 0,01$ . Что касается зависимости интенсивности изнашивания коллектора от твердости материала щетки, то на графике  $I_k(H_{щ})$  наблюдается излом, приходящийся примерно на величину твердости, равную твердости меди, из которой изготовлена щетка, а именно 770 МПа. Если материал щетки тверже материала коллектора, коллектор изнашивается гораздо интенсивнее, чем в паре трения более твердого коллектора с менее твердой щеткой.

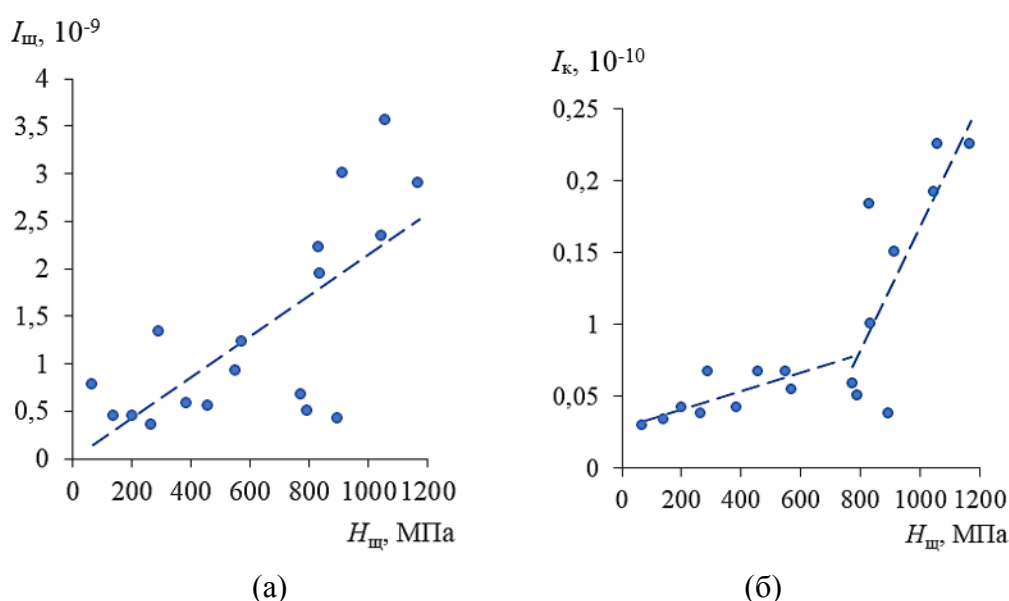


Рис. 3. Зависимость интенсивности изнашивания щетки (а) и коллектора (б) от твердости материала щетки: точки – экспериментальные результаты, пунктир – аппроксимирующая зависимость

Коэффициенты ранговой корреляции микротвердости материала щетки и интенсивностей изнашивания щетки и коллектора говорят как минимум о заметной корреляционной связи этих параметров. Для переменных  $I_{щ}, H_{щ}$  коэффициент ранговой корреляции Спирмена  $\rho = 0,65$ , Кендалла  $\tau = 0,48$ . Для переменных  $I_k, H_{щ}$  коэффициент ранговой корреляции Спирмена  $\rho = 0,78$ , Кендалла  $\tau = 0,64$ . Все коэффициенты статистически значимы на уровне  $p < 0,01$ .

Объяснение того, что интенсивность изнашивания трущихся тел в данной паре возрастает с увеличением твердости, заключается в следующем. На наш взгляд, мы имеем дело с так называемой косвенной корреляцией двух случайных величин, которые не имеют непосредственной причинно-следственной связи, а определяются общей для них причиной [8]. В данном случае высокую твердость, иногда выше твердости материала коллектора, имеют щетки, изготовленные из материалов с малым содержанием антифрикционных компонентов и высоким содержанием меди



(рис. 4а). В контакте таких материалов с медным коллектором условия трения приближаются к трению одноименных материалов, что крайне нежелательно с трибологической точки зрения. Коэффициент трения в таких парах высокий (рис. 4б), следовательно, высока и интенсивность изнашивания (рис. 5). Таким образом, зависимости, представленные на рис. 3, являются следствием зависимостей, показанных на рис. 2.

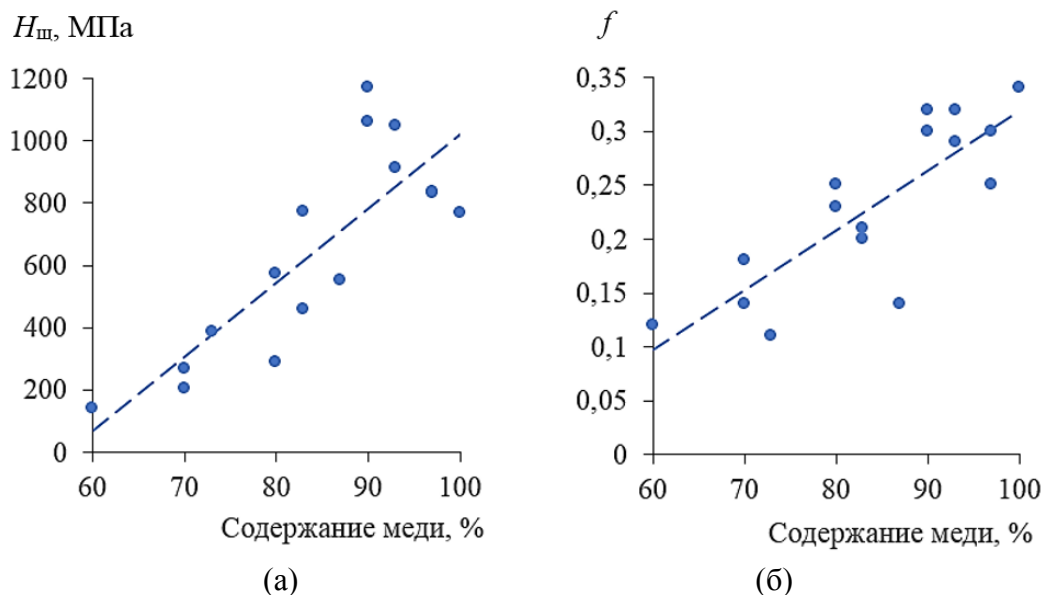


Рис. 4. Зависимость твердости (а) и коэффициента трения (б) от содержания меди в материале щетки: точки – экспериментальные результаты; пунктир – аппроксимирующая зависимость

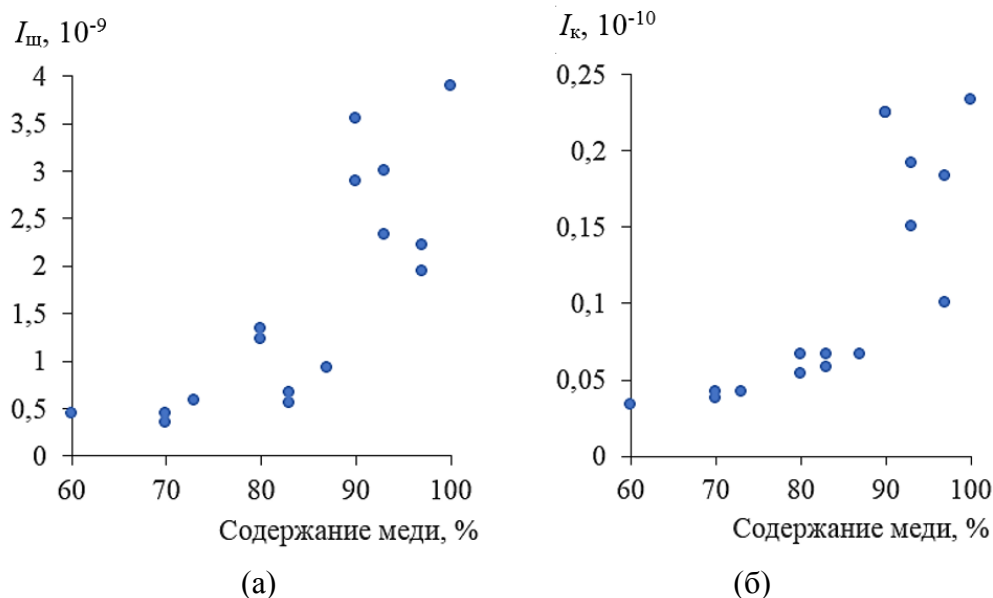


Рис. 5. Зависимость интенсивности изнашивания щетки (а) и коллектора (б) от содержания меди в материале щетки

Непараметрические критерии подтверждают высокую силу корреляционной связи интенсивностей изнашивания щетки и коллектора с процентным содержанием меди в материале щетки. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена для переменных  $I_{щ}$  (% содержания Cu)  $\rho = 0,85$ , коэффициент корреляции Кендалла  $\tau = 0,64$ . Соответственно для переменных  $I_k$  (% содержания Cu)  $\rho = 0,89$  и  $\tau = 0,75$ . Все критерии значимы на уровне  $p < 0,01$ .

Корреляция шероховатости поверхностей трения и интенсивности изнашивания не исследовалась, поскольку в приработанном контакте после завершения приработки формируется так называемая равновесная шероховатость, практически не зависящая от исходной и сохраняющаяся в процессе трения [1]. Равновесную шероховатость нельзя считать независимым параметром, влияющим на интенсивность изнашивания, так как она сама является функцией определяющих параметров трения в исследуемом контакте.

Влияние электрических параметров на интенсивность изнашивания выходит за рамки данной работы и составляет предмет самостоятельного исследования.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статистический анализ экспериментальных результатов исследования износостойкости компонентов пары трения, имитирующей скользящий электрический контакт «щетка – коллектор», выявил высокую степень корреляции линейной интенсивности изнашивания и коэффициента трения. Таким образом, коэффициент трения можно рассматривать как объективный комплексный параметр фрикционных свойств компонентов фрикционной пары и условий трения, характеризующий, в том числе, износостойкость. При исследовании степени влияния других факторов на износостойкость компонентов фрикционного контакта надо учитывать возможность косвенной корреляции анализируемых случайных величин, что показано в данной работе на примере зависимости интенсивности изнашивания щетки и коллектора от твердости материала щетки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебник для технических вузов / Чичинадзе А.В. [и др.]. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.
2. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Интеллект, 2008. 506 с.
3. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин: учебное пособие для машиностроительных специальностей вузов. М.: Высшая школа, 1991. 319 с.
4. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368 с.
5. Измайлов В.В., Гусев А.Ф., Новоселова М.В. Комплекс аппаратуры для испытаний электрофрикционных контактных соединений. Часть 1. *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: Межвузовский сборник научных трудов*. Тверь: ТвГТУ, 2022. Вып. 15. С. 29–37.
6. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для студентов вузов, обучающихся по экономическим специальностям. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2010. 551 с.

7. Хрущев М.М. Трение, износ и микротвердость материалов: избранные работы (к 120-летию со дня рождения). М.: КРАСАНД, 2012. 512 с.

8. Ферстер Э., Ренц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа. Руководство для экономистов. М.: Финансы и статистика, 1983. 304 с.

**Для цитирования:** Измайлов В.В. О некоторых корреляционных соотношениях, связанных с интенсивностью изнашивания // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2024. № 2 (22). С. 36–43.

## **ON SOME CORRELATIONS, RELATED TO WEAR RATE**

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: iz2v2@mail.ru

Correlation relationships are considered that describe the dependence of the linear wear rate of a friction contact on the friction coefficient and the hardness of the materials of the components of the friction pair. The relationships were obtained by statistical processing of experimental data relating to the brush-commutator friction pair. A strong correlation has been established between the linear wear rate of the friction pair components and the friction coefficient. A strong positive correlation of the linear wear rate with the hardness of the brush and commutator materials was also discovered, which contradicts the known results indicating an increase in wear resistance with increasing hardness of the rubbing parts. The most probable explanation for this contradiction is given. In addition, this dependence is non-monotonic with a noticeable increase in wear rate if the hardness of the brush material becomes comparable to the hardness of the commutator material.

*Keywords:* friction, friction coefficient, linear wear rate, hardness, correlations.

Поступила в редакцию/received: 15.02.2024; после рецензирования/ revised: 22.02.2024;  
принята/accepted: 27.02.2024

# НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГОРНЫЕ НАУКИ

УДК 622.331.002.5

## ОПТИМИЗАЦИЯ УГЛА УСТАНОВКИ ФРЕЗЫ ТОРФЯНОГО БРОВКОРЕЗА С ПОЗИЦИИ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ

А.Л. ЯБЛОНЕВ, д-р техн. наук

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

© Яблонев А.Л., 2024

Добыча торфа фрезерным методом предполагает послойно-поверхностную сработку картовых полей. При этом приканальные полосы из-за повышенной влажности и пониженной несущей способности оказываются необработанными, появляются бровки, затрудняющие удаление влаги с поверхностей полей и работу технологического оборудования. Решить данную проблему можно путем обработки поверхностей полей специальными бровкорезами. Однако существующие модели бровкорезов обрабатывают за один проход только одну бровку. Разработанная нами концепция торфяного бровкореза, способного за один проход обрабатывать оба края полей, примыкающих к картовому каналу, потребовала проведения экспериментальных исследований для установления оптимального угла поворота фрезы по отношению к поперечной оси машины. В представляемом исследовании, содержащем методику проведения и результаты экспериментов, величина данного угла обосновывается с позиции оптимальной энергоемкости фрезерования торфяной залежи.

*Ключевые слова:* торфяная карта, бровкорез, косоугольное фрезерование, торфяная крошка, картовый канал, энергоемкость, тензометрирование, тензодатчик.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-2-44-55**

### ВВЕДЕНИЕ

Послойная сработка поверхности торфяных карт при фрезерном способе добычи торфа [1, 2] и отсутствие ее на приканальных полосах из-за повышенной влажности последних вызывает появление необработанных «бровок», затрудняющих естественный процесс удаления поверхностных вод и осложняющих технологический цикл добычи торфа [3, 4] (рис. 1).

Необходимое для осуществления качественного технологического процесса приведение поверхности картовых полей к нормальному состоянию [5] осуществляется либо полным профилированием с использованием широкозахватных профилировщиков [6] – весьма энергозатратной операцией, либо частичным профилированием путем срезания бровок специальными машинами – бровкорезами (профилировщиками краев), наибольшее распространение среди которых получила финская конструкция PRF-240 [7] и ее белорусский аналог ПР-1 [8]. Последняя операция менее энергозатратна и позволяет, благодаря косоугольному расположению

рабочего органа, не только обрабатывать края картовых полей, срезая с них бровки, но и отбрасывать превращенный в крошку торф к центру поля, создавая тем самым рельеф поверхности.

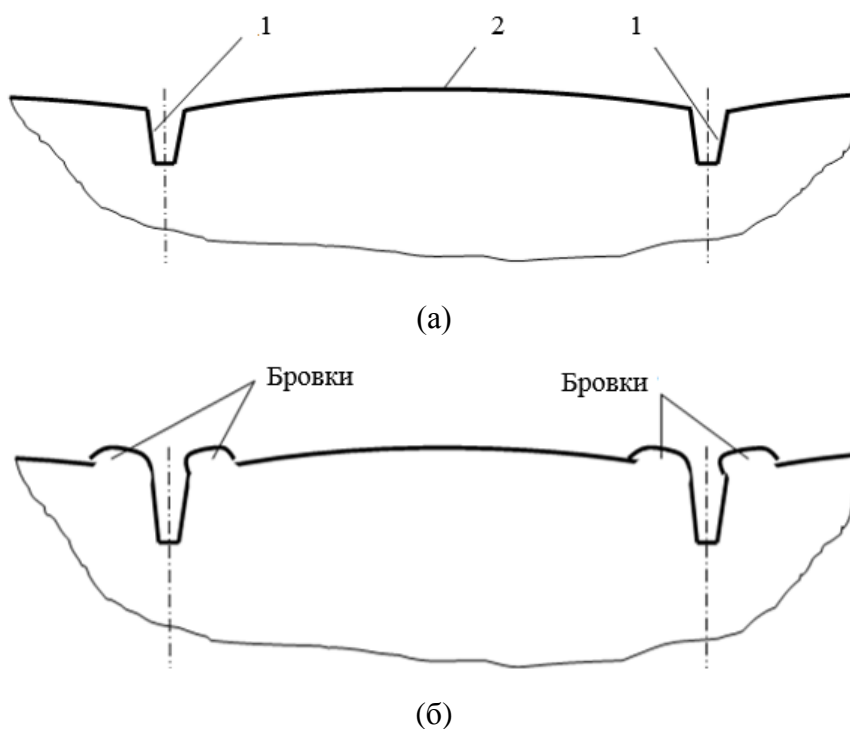


Рис. 1. Нормальный профиль картового поля в поперечной плоскости (а) и образование бровок (б): 1 – картовые каналы; 2 – выпуклая поверхность картового поля

Однако описанные бровкорезы за один проход способны обрабатывать лишь одну кромку картового поля, что весьма неудобно. Для устранения этого недостатка нами была разработана концепция усовершенствованного бровкореза [9] (рис. 2).

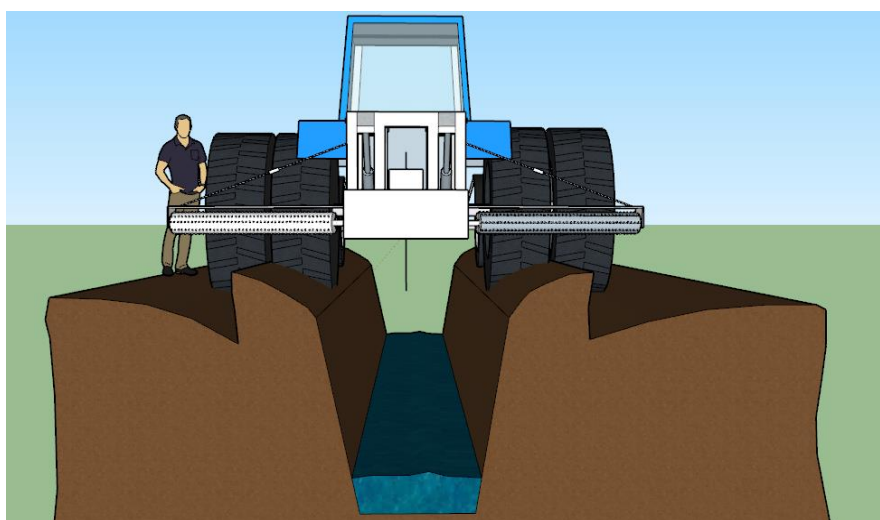


Рис. 2. 3D-модель профилировщика краев торфяных карт

Представленный бровкорез имеет два косоугольно расположенных рабочих органа (фрезы) и, благодаря сдвоенным колесам, двигаясь по бровкам, обрабатывает оба края карт, прилегающих к каналу. При этом остается существенным, на какой угол по отношению к поперечной оси машины должны быть развернуты фрезы [10, 11]. Очевидно, что данный угол должен быть минимальным и достаточным для того, чтобы, во-первых, при работе не происходило забрасывание торфяной крошкой картовых каналов; во-вторых, не наблюдалось интенсивного роста энергоемкости фрезерования [12–14], а следовательно, и боковых усилий, передающихся на ходовую часть машины; в-третьих – не происходило значительного уменьшения активной ширины захвата фрезы, в-четвертых – в конструкции можно было бы использовать не специальные угловые редукторы, как в прототипах [7, 8], а стандартные широко распространенные детали и узлы. С целью определения оптимальной величины этого угла в лаборатории кафедры «Технологические машины и оборудование» были произведены экспериментальные исследования.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В экспериментальных исследованиях применялась значительно модернизированная лабораторная установка, обеспечивающая возможность поворота фрезы на определенный угол (т.е. проведения исследований по косоугольному фрезерованию) и оснащенная системой цифрового тензометрирования ZETLAB [15–18].

Общий план проведения экспериментальных работ включал два этапа, на которых оптимальный угол поворота фрезы относительно поперечной оси машины определялся по факту отсутствия следов вылетающей фрезерной крошки на опытном экране, как гарантия отсутствия эффекта забрасывания картовых каналов при работе, и по критерию оптимальной энергоемкости косоугольного фрезерования.

Методика, особенности и результаты первого этапа подробно описаны в работах [4, 18], поэтому нет смысла вновь повторять их. Отметим лишь, что по фактам отсутствия забрасывания крошкой картовых каналов и отсутствия интенсивного уменьшения активной ширины захвата фрезы, минимальным (а следовательно, и оптимальным) оказался угол поворота фрезы на  $20^\circ$  относительно поперечной оси машины.

Второй этап исследования основывался на определении оптимальной энергоемкости фрезерования при различных углах установки фрезы, для чего использовались тензометрическая станция (анализатор спектра) ZET 017-T8, S-образный тензодатчик PST Loadcell, прикрепленный к поворачиваемому на подшипниках приводу фрезы, а также ноутбук с установленным программным обеспечением ZETLAB [15–18]. Поскольку для воспроизводства этих экспериментов необходимы знания основных настроек системы и методики проведения, остановимся на них подробнее.

Настройка тензостанции осуществляется следующим образом. На главной панели программы ZETLAB во вкладке «Генераторы» выбирается «Генератор сигналов». В открывшемся окне (рис. 3) выбираются генератор и настройки синусоидального сигнала: частота 1 000 Гц, уровень 0...3 В, смещение 0...3 В.

Нажатием кнопки «Включить» осуществляется включение выбранного генератора сигналов с настройками, после чего открывается окно «Измерение /Отображение», в котором выбирается программа «Тензометр» (рис. 4), предназначенная для проведения всех видов тензоизмерений с помощью тензометрических датчиков

(например, датчиков силы, датчиков крутящего момента, мостовых и полумостовых схем на тензорезисторах) и тензостанции ZET 017-T8 [19].

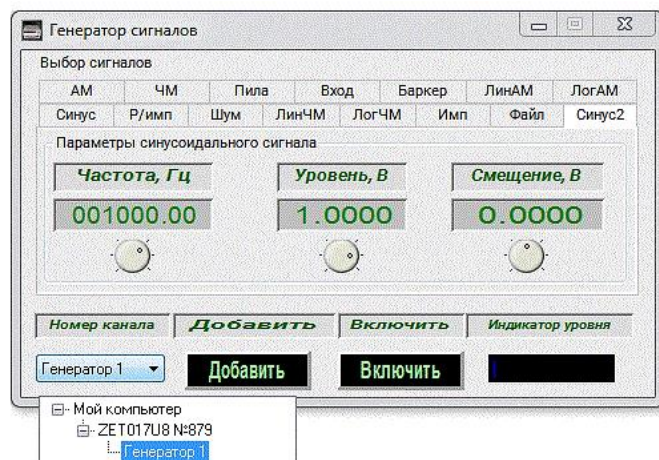


Рис. 3. Окно выбора генератора и параметров синусоидального сигнала

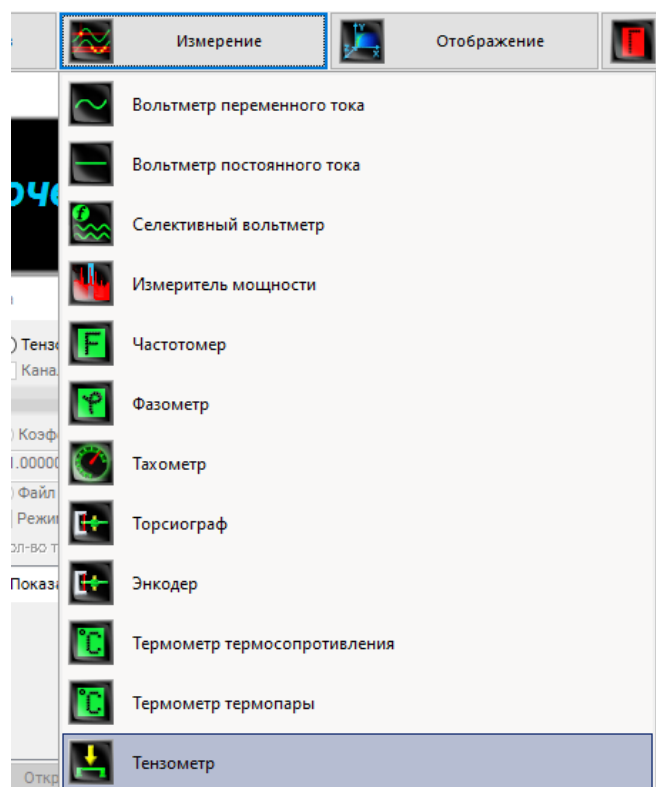


Рис. 4. Окно «Измерение/Отображение»

Программа «Тензомер» создает виртуальный канал, содержащий результаты измерений, и открывает диалоговое окно «Настройка параметров тензометра» (рис. 5).

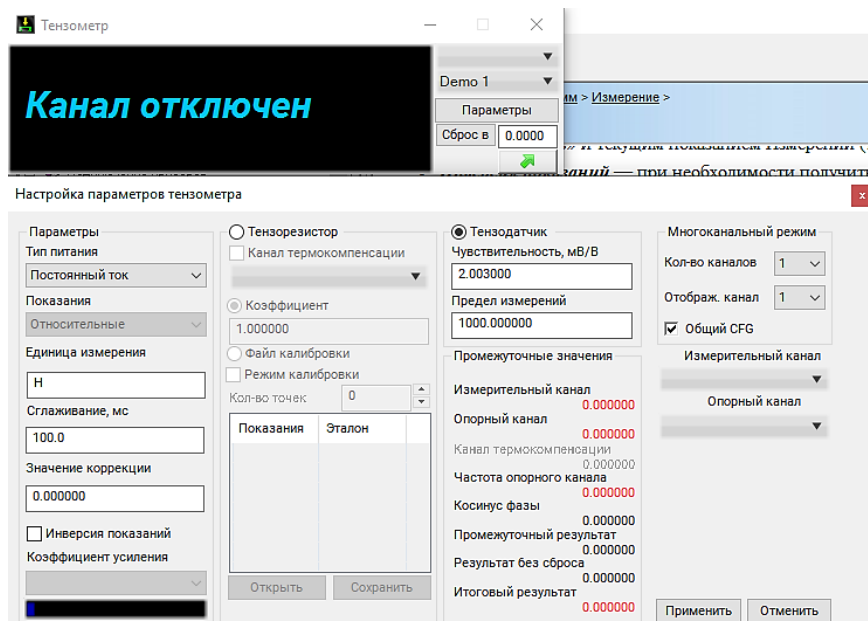


Рис. 5. Диалоговое окно «Настройка параметров тензометра»

В открывшемся окне выбираются:

ток питания датчиков – переменный или постоянный;

показания – абсолютные или относительные (при выборе относительных показаний необходимо задать два канала – измерительный и опорный; опорным по умолчанию является канал генератора; при выборе абсолютных показаний окно «Опорный канал» деактивируется);

единица измерения, которая будет отображаться на индикаторе программы рядом со значением – для рассматриваемого случая это Ньютоны (Н);

сглаживание – период, за который происходит усреднение измеренных значений (если интервал одного измерения составляет 100 мс, то время сглаживания необходимо задавать кратным 100 мс);

значение коррекции – значение, которое не учитывается при проведении измерений в случае активации кнопки на рабочем окне программы «Сброс в» (в данном поле отображается разница между величиной, указанной в поле «Сброс в», и текущим показанием измерений. Например, если в окне «Сброс в» устанавливать «0» а при текущем измерении «3», то в поле коррекции будет значение «3»);

инверсия показаний (в окне при необходимости ставится галочка), позволяющая получить результаты, противоположные по значению;

коэффициент усиления – усиление по измерительному каналу в 1, 10, 100 или 1 000 раз.

При использовании в качестве чувствительного элемента тензорезисторов настройка параметров осуществляется в соответствующем поле «Тензорезистор», при этом поле «Тензодатчик» деактивируется [19]. Для настройки тензодатчиков доступны два параметра, указанных в паспорте тензодатчика: чувствительность, мВ/В; предел измерений – максимальное значение деформации, которое способен зафиксировать датчик (чувствительность тензодатчика PST Load Cell составляет 2,003, а предел измерений 1 000 Н).



После фиксации указанных настроек кнопкой «Применить» открывается окно определения способа регистрации сигнала, где необходимо выбрать программу «Многоканальный самописец» (рис. 6).

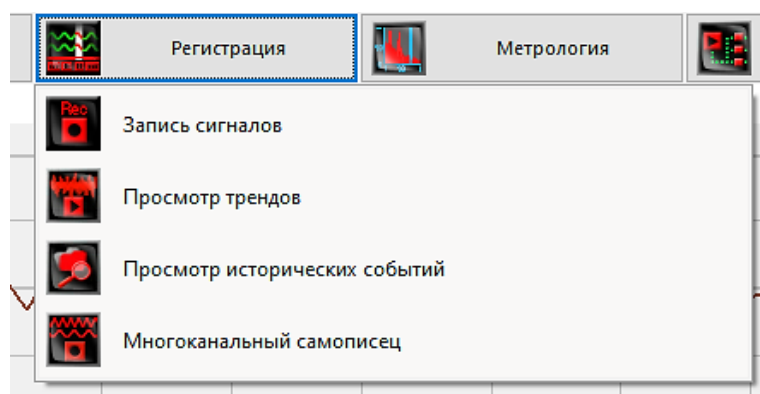


Рис. 6. Окно определения способа регистрации сигнала

Программа «Многоканальный самописец» позволяет непрерывно записывать полученные параметры сигналов в файл – электронный цифровой протокол испытаний. При этом на экране монитора открывается рабочее окно программы, в котором отображаются время и среднее квадратичное значение уровня измеряемого сигнала (рис. 7).

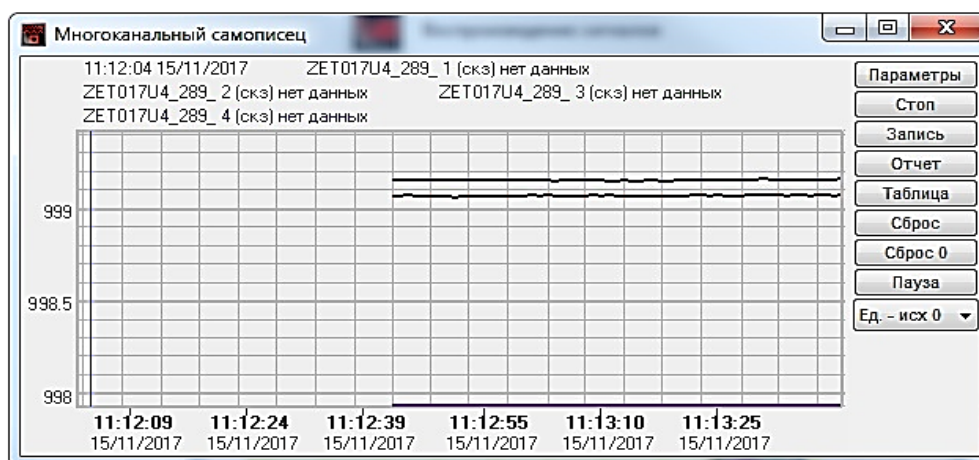


Рис. 7. Рабочее окно программы «Многоканальный самописец»

Нажатием на кнопку «Параметры» осуществляется переход в окно настроек многоканального самописца (рис. 8). В открывшемся окне выбираются следующие параметры измерений:

- интервал – 10,0;
- усреднение – 0,1;
- единица измерения – секунды;
- ширина окна – 1;
- количество измеряемых параметров – 2 (время и сила).

Нажатием кнопки «Применить» все выбранные параметры сохраняются в настройках [19]. После выполнения описанных основных шагов программный комплекс ZETLAB считается настроенным и готовым к работе.

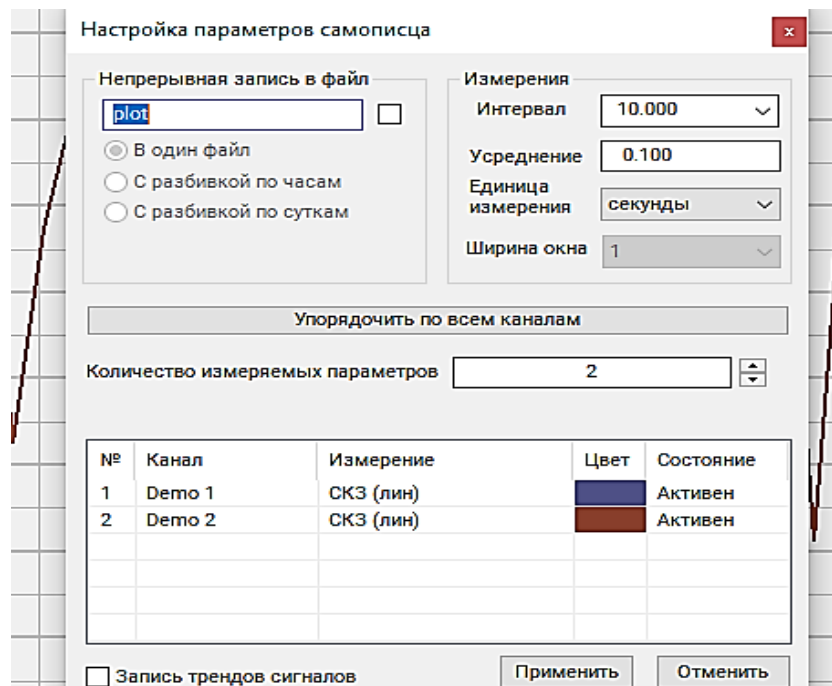


Рис. 8. Окно настроек параметров самописца

Для экспериментального исследования по оценке энергоемкости фрезерования был подготовлен торфяной монолит [4, 18]. После его закрепления и включения электродвигателя привода фрезы лабораторной установки производился предварительный полировочный срез монолита для создания относительно ровной поверхности. От уровня этой поверхности в дальнейшем отсчитывалась глубина первого фрезерования. В качестве настраиваемых параметров установки были выбраны: глубина фрезерования  $H = 8$  мм; скорость поступательного движения тележки с монолитом  $w = 0,381$  м/с; частота вращения фрезы  $n = 1\,000$  об/мин [4, 18].

Для начала записи сигнала в окне программы «Многоканальный самописец» необходимо нажать кнопку «Запись». Затем включается электродвигатель привода тележки с монолитом. По завершении фрезерования монолита следует остановить тележку и прекратить запись сигнала командой «Стоп». Тележка с монолитом возвращается в исходное положение, электродвигатель привода фрезы выключается.

После каждого опыта следует устанавливать глубину фрезерования равной 8 мм и увеличивать угол поворота фрезы на  $5^\circ$ .

Определение энергоемкости фрезерования осуществлялось по осциллограммам нагрузки  $F$ , снятым с помощью тензостанции ZET 017-T8 при девяти положениях фрезы с пятикратной повторяемостью опытов. При этом на каждой осциллограмме, для исключения холостой работы фрезы и пиковых нагрузок, связанных со входом фрезы в монолит и выходом из него, вручную определялись моменты начала и конца измерений. Расчет энергоемкости при фрезеровании  $A$ , Дж/м<sup>3</sup>, выполнялся по формуле

$$A = \frac{N_\phi}{Q_\phi} = \frac{M_\phi \omega}{B_\Delta H w} = \frac{\pi n L F}{30 B_\Delta H w},$$

где  $N_\phi$  – мощность, Вт;  $Q_\phi$  – производительность фрезерной установки, м<sup>3</sup>/с;  $M_\phi$  – момент сопротивления фрезерованию на валу фрезы, Н · м;  $\omega$  – угловая скорость

вращения фрезы,  $c^{-1}$ ;  $B_A$  – активная ширина фрезы, м;  $L = 0,2 \dots 0,5$  м – длина плеча двухплечего рычага на статоре электродвигателя привода фрезы (зависит от места установки датчика).

Следует отметить, что в связи с косым расположением фрезы уменьшается ее активная ширина захвата. Методика расчета активной ширины фрезы подробно описана в работе [20], однако этот параметр может быть определен и по упрощенной формуле

$$B_A = B \cdot \cos \varphi,$$

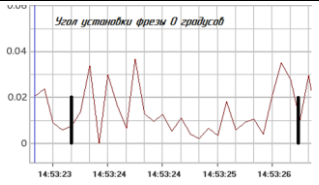
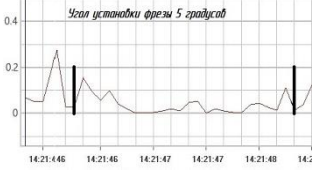


где  $B = 0,16$  м – общая ширина фрезы;  $\varphi$  – угол поворота фрезы в плане (изменялся в ходе экспериментов от  $0$  до  $40^\circ$  с шагом  $5^\circ$ ).

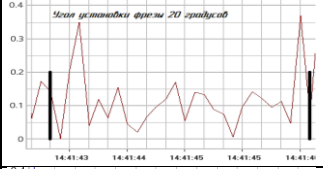

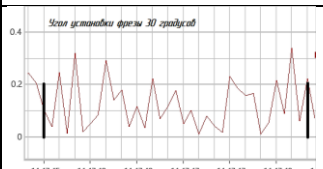
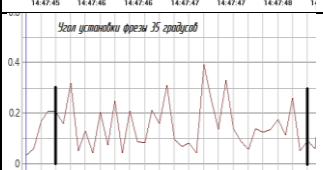

Оценивать уменьшение активной ширины фрезы при ее повороте предлагается коэффициентом использования ширины фрезы  $K_B$ , представляющим собой отношение активной ширины захвата фрезы  $B_A$  к общей ширине фрезы  $B$  [4, 18, 20].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты экспериментов по оценке коэффициента использования ширины фрезы  $K_B$  и средней удельной энергоемкости фрезерования  $A$  при установке фрезы под углом от  $0^\circ$  до  $40^\circ$  представлены в таблице.

Таблица. Результаты исследования косоугольного фрезерования торфяного монолита

№ серии опытов	$\varphi, ^\circ$	Фрагмент осциллограммы нагрузки фрезы	$K_B$	$A, \text{кДж/м}^3$
1	0		1,0	1,29
2	5		0,996	3,54
3	10		0,985	4,20
4	15		0,966	4,53

№ серии опытов	$\varphi, ^\circ$	Фрагмент осциллограммы нагрузки фрезы	$K_B$	$A, \text{кДж/м}^3$
5	20		0,940	6,40
6	25		0,907	8,32
7	30		0,867	12,55
8	35		0,819	12,68
9	40		0,766	19,13

Зависимость удельной энергоёмкости фрезерования торфяного монолита от угла установки фрезы, построенная на основании приведенных в таблице данных, представлена на рис. 9. Как видно из графика, оптимальная величина угла составляет  $20^\circ$  относительно поперечной оси машины.

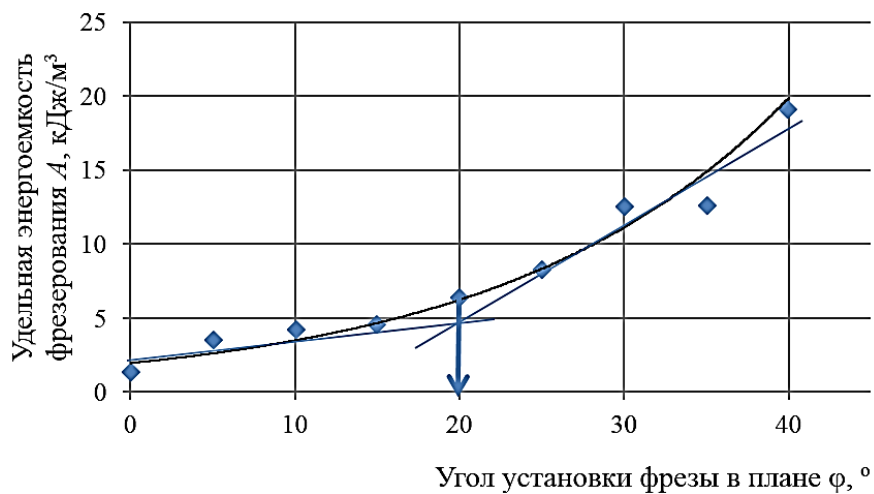


Рис. 9. Зависимость удельной энергоёмкости фрезерования от угла установки фрезы

Как видно из рис. 9, при дальнейшем увеличении угла установки фрезы начинается более интенсивное повышение удельной энергоемкости фрезерования, что может негативно сказаться на всем производственном процессе.

Аппроксимация опытных данных позволила получить математическую модель, описывающую зависимость удельной энергоемкости фрезерования от угла установки фрезы относительно поперечной оси при коэффициенте детерминации  $R^2 = 0,936$ :

$$A = 1,95e^{0,058\varphi}.$$

Таким образом, угол установки фрезы торфяного бровкореза  $20^\circ$  может считаться оптимальным сразу по ряду критериев – отсутствию забрасывания торфяной крошки прилегающего картового канала, интенсивности уменьшения активной ширины захвата фрезы [4, 18] и интенсивности роста удельной энергоемкости фрезерования.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью проведенного экспериментального исследования обоснована величина угла установки фрезы торфяного бровкореза с позиции оптимальной энергоемкости. Этот угол составляет  $20^\circ$  относительно поперечной оси. Следует отметить, что данный результат хорошо согласуется с выводами статей [4, 18].

Угол поворота фрезы на существующих бровкорезах [7, 8] составляет около  $30^\circ$ . Достичь поворота фрезы на такой угол без применения специальных угловых редукторов не представляется возможным. Поскольку на основании комплекса проведенных нами исследований установлено, что данный угол должен быть не  $30^\circ$ , а  $20^\circ$ , то задача значительно упрощается, так как подобный угол можно получить путем установки карданных шарниров неравных угловых скоростей.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность аспиранту Жукову Никите Михайловичу, принимавшему участие в организации и проведении экспериментальных исследований.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Мисников О.С., Копенкина Л.В. Возникновение торфяного дела в России // *Горный журнал*. 2020. № 2. С. 95–99.
2. Самсонов Л.Н. Фрезерование торфяной залежи. М.: Недра, 1985. 211 с.
3. Ratamäki O., Jokinen P., Albrecht E., Belinskij A. Framing the Peat: The Political Ecology of Finnish Mire Policies and Law // *Mires and Peat*. 2019. V. 24 (17). P. 1–12.
4. Яблонев А.Л., Жуков Н.М. Экспериментальное обоснование угла установки фрезы торфяного бровкореза // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 2 (18). С. 21–30.
5. Kozulin A., Tanovitskaya N., Minchenko N. Developing a National Strategy for the Conservation and Sustainable Use of Peatlands in the Republic of Belarus // *Mires and Peat*. 2018. V. 21. Article 05. P. 1–17.
6. Профилировщики торфяные шнековые. URL: <https://amkodor.by/catalog/cat/tehnika-dlya-torfa/profilirovshhik-torfyanoj-shnekovyj/> (дата обращения: 07.01.2024).

7. MERIPEAT. URL: <https://www.meripeat.com/ru/products-ru/milled-peat-production-ru> (дата обращения: 02.11.2022).
8. Профилировщик ПР-1. URL: <https://erm.mogilev.energo.by/ru-ru/продукция/торфозаготовка/профилировщикпр1.aspx> (дата обращения: 07.01.2024).
9. Патент РФ 180545 *Профилировщик краев торфяных карт* / Яблонев А.Л., Жуков Н.М., Гусева А.М.; Заявл. 12.03.2018. Опубл. 18.06.2018. Бюл. № 17.
10. Cheluszka P., Jagieła-Zajac A. Determining the Position of Pick Holders on the Side Surface of the Working Unit of the Cutting Machine in the Robotic Technology of their Assembly // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. № 261. P. 012003.
11. Medolago A., Melzi S. A Flexible Multi-Body Model of a Surface Miner for Analyzing the Interaction between Rock-cutting Forces and Chassis Vibrations // *Int. J. of Mining Science and Technology*. 2021. V. 31. Is. 3. P. 365–375.
12. Фомин К.В. Методика оценки спектральной плотности момента сопротивления на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата // *Записки горного института*. 2020. Т. 241. С. 58–67.
13. Фомин К.В., Рахутин М.Г. Моделирование повреждающих воздействий на режущих элементах рабочего органа фрезерующего агрегата при взаимодействии с торфом // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техн. журнал)*. 2019. № S39. С. 36–46.
14. Фомин К.В. Моделирование нагрузок на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата с учетом погрешности расстановки режущих элементов // *Горные науки и технологии*. 2022. Т. 7. № 2. С. 161–169.
15. Яблонев А.Л. Цифровое тензометрирование при лабораторном исследовании процесса фрезерования торфяной залежи // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техн. журнал)*. 2018. № 1. С. 182–189.
16. Мисников О.С., Копенкина Л.В., Зюзин Б.Ф. Научные школы Московского торфяного института и их развитие в Тверском государственном техническом университете // *Горный журнал*. 2022. № 5. С. 9–22.
17. Патент РФ 2755779 *Лабораторный стенд для исследования прямоугольного и косоугольного резания фрезой торфяных монолитов* / Яблонев А.Л., Гусева А.М., Жуков Н.М.; Заявл. 30.12.2020. Опубл. 21.09.2021. Бюл. № 27.
18. Яблонев А.Л., Жуков Н.М. Обоснование угла установки фрезы профилировщика краев торфяных карт // *Горный журнал*. 2023. № 3. С. 55–59.
19. Программное обеспечение ZETLAB. URL: <https://ZETLAB.com/shop/programmnoe-obespechenie/programmnoe-obespechenie-ZETLAB/ZETLAB-tenzo/> (дата обращения: 08.06.2020).
20. Яблонев А.Л., Жуков Н.М. Расчет момента сопротивления фрезерованию торфяной залежи при попадании фрезы на пень и активной ширины рабочего органа // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 2 (10). С. 51–61.

**Для цитирования:** Яблонев А.Л. Оптимизация угла установки фрезы торфяного бровкореза с позиции энергоемкости фрезерования // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 2 (22). С. 44–55.

# OPTIMIZATION OF THE INSTALLATION ANGLE OF THE CUTTER OF THE PEAT EDGE CUTTER FROM THE POSITION OF ENERGY INTENSITY OF MILLING

A.L. YABLONEV, Dr. Sc.

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: alvovich@mail.ru

Peat extraction by milling involves layer-by-layer surface treatment of karst fields. At the same time, the channel strips due to high humidity and reduced load-bearing capacity turn out to be untreated, edges appear that make it difficult to remove moisture from the surfaces of fields and the operation of technological equipment. This problem can be solved by treating the surfaces of the fields with special eyebrow cutters. However, existing models of brow cutters process only one brow in one pass. The concept of a peat brow cutter developed by us, capable of processing both edges of the fields adjacent to the cart channel in one pass, required experimental studies to establish the optimal angle of rotation of the cutter relative to the transverse axis of the machine. In the presented study, which contains the methodology and experimental results, the value of this angle is justified from the perspective of the optimal energy intensity of milling a peat deposit.

*Keywords:* peat production field, edge cutter, oblique milling, peat field channel, energy intensity, strain gauging, load cell.

Поступила в редакцию/received: 09.01.2024; после рецензирования/revised: 24.01.2024;  
принята/accepted: 30.01.2024

УДК 622.232.7

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕКТОРА ВНЕШНЕГО ВОЗМУЩЕНИЯ НА ОСЕВОЙ КОРОНКЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА

О.Е. ШАБАЕВ<sup>1</sup>, д-р. техн. наук, А.Ю. ДОВГАНЬ<sup>1,2</sup>, аспирант

<sup>1</sup>Донецкий национальный технический университет,  
283001, Донецк, ул. Артема, 58, e-mail: donntu.info@mail.ru

<sup>2</sup>ГУ «Автоматгормаш им. В.А. Антипова»,  
283003, Донецк, пр. Ильича, 93, e-mail: avtomatgormash@mail.ru

© Шабает О.Е., Довгань А.Ю., 2024

Разработана комплексная модель формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке исполнительного органа, учитывающая влияние горно-геологических условий и режимных параметров работы комбайна на процесс разрушения горного массива, которая состоит из моделей разрушаемого массива и поверхности забоя, нахождения координат вершины резца в забое, оценки условия контактирования резца с массивом, определения параметров процесса разрушения массива резцами коронки для определения усилий резания и подачи на резце с учетом

выполнения условия контакта резца с забоем. Адекватность математической модели оценивалась путем сравнения показателей, полученных в ходе модельных и экспериментальных исследований: средней мощности на разрушение за цикл, теоретической производительности, удельных энергозатрат за цикл, длительности обработки забоя.

*Ключевые слова:* математическая модель, проходческий комбайн, резец, исполнительный орган, вектор внешнего возмущения.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-2-55-72**

## **ВВЕДЕНИЕ**

Своевременная подготовка новых забоев и магистральных выработок требует повышения темпов проходки. Так, по данным исследователей ДонУГИ среднемесячное подвигание линии действующих очистных забоев на шахтах ДНР составляет до 68,3 м/мес., при этом скорость проведения подготовительных выработок не превышает 45,6 м/мес. На шахтах ДНР применяются проходческие комбайны стреловидного типа как с продольно-осевыми коронками (ГПКС, КСП-32, КСП-35, EBZ-160), так и с поперечно-осевыми (КПД). Наибольшее распространение (75,3 %) получили проходческие комбайны серии КСП производства ООО «НПО «Ясиноватский машиностроительный завод».

Экспериментальные исследования нагрузочных характеристик двигателя привода исполнительного органа комбайна КСП-35 в представительных условиях его эксплуатации позволили выявить значительную неравномерность значений характеристик рабочего процесса, обусловленную смещением машины относительно продольной оси выработки вследствие погрешностей ручного управления. Так, средняя за цикл обработки забоя мощность двигателя изменяется от 41,9 до 76,5 кВт, производительность – от 0,147 до 0,304 м<sup>3</sup>/мин, а удельные энергозатраты – в пределах от 2,4 до 6,96 кВт · ч/м<sup>3</sup> [1]. Смещение проходческого комбайна от продольной оси выработки в ту или иную сторону обуславливает изменение глубины зарубки в процессе горизонтального реза, увеличение переборов породы, что приводит к изменению спектра нагрузок на исполнительном органе и, как следствие, к снижению ресурса элементов трансмиссии на 64 % [2]. Это вызывает необходимость анализа режимов работы исполнительного органа проходческого комбайна, оснащенного осевой коронкой, в ручном режиме управления и разработки математической модели формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке при ее взаимодействии с горным массивом в режиме послойного разрушения горизонтальными резами и смещение комбайна относительно продольной оси выработки. Математическая модель вектора внешнего возмущения необходима для выполнения на ее основе теоретических исследований по установлению закономерностей влияния смещения проходческого комбайна относительно продольной оси выработки на показатели эффективности его работы и ресурс элементов трансмиссии.

Разработке математических моделей формирования вектора внешнего возмущения на исполнительном органе горных выемочных машин посвящено множество исследований. В частности, в работах [3, 4] содержатся математические модели, описывающие процесс формирования вектора внешнего возмущения на аксиальной коронке, и предложены расчетные схемы для определения вектора внешнего возмущения на аксиальной коронке разных форм, формализации



поверхности забоя и структуры массива. На основе большого числа экспериментальных исследований шнековых, барабанных исполнительных органов, радиальных и аксиальных коронок выявлены основные факторы, определяющие величину и характер изменения составляющих вектора внешнего возмущения, и разработаны математические модели для его описания [5–13]. Работы [11, 14–16] посвящены исследованию динамического функционирования проходческих комбайнов методом математического моделирования. В работе [4] предложен метод разработки имитационных математических моделей рабочих процессов выемочных машин как пространственных многомассовых динамических систем переменной структуры на базе использования наборов функционально законченных элементов (ФЗЭ). При этом комплексная имитационная модель динамического функционирования комбайна представляет собой взаимоувязанную совокупность частных математических моделей ФЗЭ. Существующие математические модели учитывают предыдущие проходы коронки и форму выработанного пространства для определения параметров среза.

Таким образом, процесс формирования вектора внешнего возмущения на аксиальной коронке достаточно хорошо изучен и описан математическими моделями с достаточной степенью достоверности, однако данные математические модели в существующем виде неприменимы в полной мере к проходческому комбайну с осевыми коронкам и требуют уточнения. Кроме того, в указанных работах не учитывается фактор смещения проходческого комбайна после передвижки. Поэтому разработка математической модели формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке исполнительного органа проходческого комбайна при разрушении горного массива является актуальной научной задачей, направленной на повышение эффективности его работы.

Цель работы заключается в создании комплексной модели формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке проходческого комбайна с учетом особенностей его смещения в процессе передвижки, стружкообразования и контактирования резца с забоем.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Комплексная математическая модель формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке, учитывающая влияние горно-геологических условий и режимных параметров работы комбайна на процесс разрушения горного массива, состоит из моделей разрушаемого массива и поверхности забоя, определения координат вершины резца в забое, оценки условия контактирования резца с массивом и определения параметров процесса разрушения массива резцами коронки.

## **ФОРМАЛИЗАЦИЯ РАЗРУШАЕМОГО МАССИВА И ПОВЕРХНОСТИ ЗАБОЯ**

Математическая модель разрушаемого массива используется для учета влияния структуры пласта на формирование вектора внешнего возмущения [4].

Расчетная схема, предложенная авторами [4, с. 44] для разработки математической модели разрушаемого массива, представлена на рис. 1, где показано сечение проходческого забоя, состоящего из трех прослоек с углом падения  $\alpha_n$ . Система координат  $OXYZ$  жестко связана с забоем.  $H_1$  и  $H_2$  – расстояние по оси  $OZ$  до верхней границы соответствующего прослойка. Исходными данными для расчета являются координаты текущего резца ( $X_i, Y_i, Z_i$ ) в системе координат забоя  $OXYZ$ .

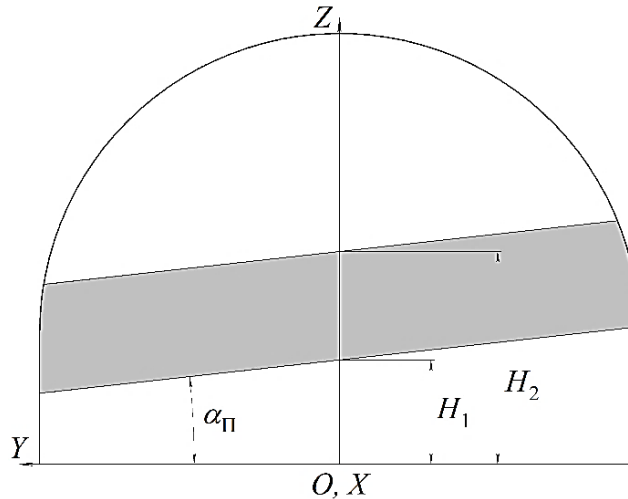


Рис. 1. Расчетная схема для разработки математической модели разрушаемого массива

Математическая модель определения текущего номера прослойка:

$$\begin{cases} l = \overline{1, N_{\pi}} . \\ \text{Если } Z_i < H_l - Y_i \operatorname{tg} \alpha_{\pi}, \\ \text{то } m_i = l, l = N_{\pi}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $l$  – номер прослойка;

$N_{\pi}$  – количество разрушаемых прослойков;

$H_l$  – расстояние от почвы выработки до верхней поверхности  $l$ -го прослойка вдоль оси  $OZ$ ;

$m_i$  – номер прослойка массива, разрушаемого  $i$ -м резцом.

В интегрируемом виде математическая модель разрушаемого массива запишется как

$$m_i = \bar{F}_M(\bar{X}_i(X_i, Y_i, Z_i), \bar{P}_M), \quad (2)$$

где  $\bar{F}_M$  – вектор-функция определения прослойка массива, разрушаемого  $i$ -м резцом;

$\bar{X}_i = (X_i, Y_i, Z_i)$  – входной вектор, составляющими которого являются координаты вершины резца, разрушающего забой;

$\bar{P}_M\{N_{\pi}, \alpha_{\pi}, H_l, fz_l(\bar{Y}_{pi}), fy_l(\bar{Y}_{pi}), fx_l(\bar{Y}_{pi}), l = \overline{1, N_{\pi}}\}$  – вектор параметров структуры и зависимостей определения составляющих сил резания разрушаемого массива, компонентами которого являются:

$fz_l(\bar{Y}_{pi}), fy_l(\bar{Y}_{pi}), fx_l(\bar{Y}_{pi})$  – зависимости для определения составляющих сил резания, подачи и бокового усилия при разрушении  $l$ -го прослойка;

$\bar{Y}_{pi}\{\bar{V}_p, \bar{V}_{\pi}, h_i, t_i\}$  – вектор параметров процесса разрушения массива  $i$ -м резцом;

$\bar{V}_p\{V_{py_i}, V_{pz_i}\}$  – скорость резания на  $i$ -м резце;

$\bar{V}_{\pi}\{V_{\pi y_i}, V_{\pi z_i}\}$  – скорость подачи на  $i$ -м резце.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ РЕЗЦА ОСЕВОЙ КОРОНКИ В СИСТЕМЕ КООРДИНАТ ВЫРАБОТКИ

Для определения координат вершины  $i$ -го резца осевой коронки проходческого комбайна в неподвижной системе координат выработки  $OXYZ$  составлена расчетная схема, представленная на рис. 2.

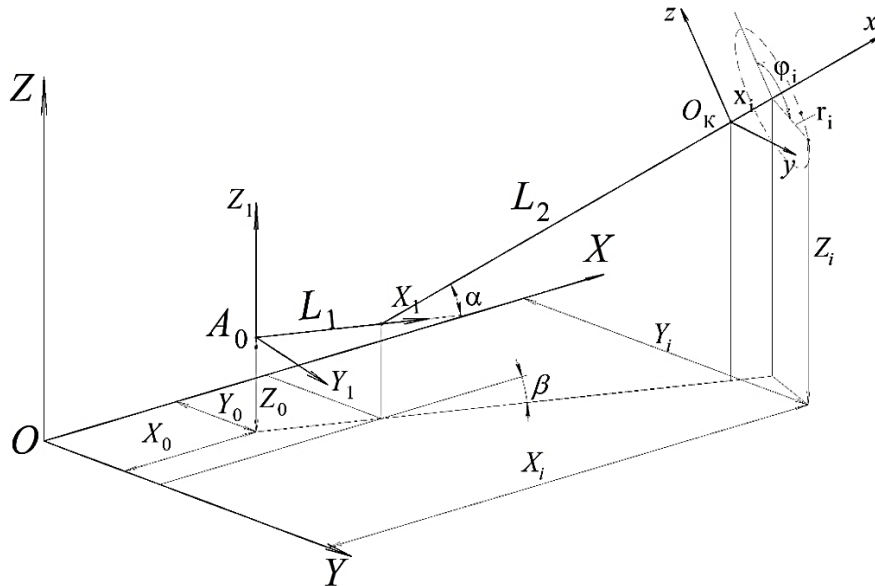


Рис. 2. Расчетная схема для определения координат положения вершины резца осевой коронки в системе координат выработки

На рис. 2 показано положение исполнительного органа в неподвижной системе координат  $OXYZ$ , жестко связанной с забоем, при его повороте в горизонтальной плоскости относительно оси поворотной турели, проходящей через точку  $A_0$  на угол  $\beta$ , и подъеме стрелы длиной  $L_2$  в вертикальной плоскости на угол  $\alpha$  ( $L_1$  – расстояние между осями поворота стрелы в горизонтальной и вертикальной плоскостях). Локальная система координат (ЛСК)  $A_0X_1Y_1Z_1$  жестко связана с корпусом проходческого комбайна. Система координат  $O_kxyz$  жестко связана со стрелой. Ось  $O_kx$  направлена вдоль оси стрелы и совпадает с осью вращения коронки. Ось  $O_kz$  находится в вертикальной плоскости, точка  $O_k$  – в основании коронки. Положение резца в системе координат  $O_kxyz$  задано его параметрами в схеме набора: радиусом установки  $r_i$ , углом поворота  $\varphi_i$  и смещением вдоль оси коронки  $x_i$ .

Математическая модель определения координат вершины резца в ЛСК  $A_0X_1Y_1Z_1$  согласно расчетной схеме, приведенной на рис. 2, имеет вид

$$\begin{cases} X_{1i} = (L_1 + (L_2 + x_i) \cos \alpha) \cos \beta, \\ Y_{1i} = (L_1 + (L_2 + x_i) \cos \alpha + r_i \sin \varphi_i) \cos \beta, \\ Z_{1i} = (L_2 + x_i) \sin \alpha + r_i \cos \varphi_i \cos \alpha. \end{cases} \quad (3)$$

Для определения координат  $i$ -го резца  $(X_i, Y_i, Z_i)$  в неподвижной системе координат выработки после передвижки комбайна необходимо ввести матрицу

направляющих косинусов, определяющих комбинацию последовательных поворотов вокруг осей вращающейся системы координат:

$$(X_i, Y_i, Z_i) = R \cdot \begin{bmatrix} X_{1i} \\ Y_{1i} \\ Z_{1i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{0x} + \Delta X \\ A_{0y} + \Delta Y \\ A_{0z} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $R = R_z(\varphi) \cdot R_x(\theta) \cdot R_z(\psi)$  – матрица направляющих косинусов;

$\Delta Y$  – смещение проходческого комбайна относительно продольной оси выработки после передвижки;

$\Delta X$  – передвижка комбайна вдоль оси выработки.

В интегрированном виде математическая модель определения координат вершины резца в забое запишется в виде

$$\bar{X}_i = \bar{F}_{пр}(\bar{X}_{пр}, \bar{P}_{сп}), \quad (5)$$

где  $\bar{F}_{пр}$  – вектор функции определения координат положения резца в пространстве забоя;

$\bar{X}_{пр}(L_2, \alpha, \beta, x_i, \varphi_i, r_i)$  – входной вектор, компонентами которого являются длина стрелы  $L_2$  и параметры ее положения ( $\alpha, \beta$ ), а также параметры вершины резца ( $r_i, \varphi_i, x_i$ ) в системе  $O_{кхуз}$ ;

$\bar{P}_{сп}\{L_1, A_{0x}, A_{0y}, A_{0z}\}$  – вектор параметров системы подвески рабочего органа.

### УСЛОВИЕ КОНТАКТА РЕЗЦА С ЗАБОЕМ

Наряду с параметрами разрушаемого массива на величину и характер изменения нагрузок, действующих на исполнительный орган при его взаимодействии с разрушаемым массивом, определяющее влияние оказывают величина и форма обрабатываемого сечения. От этих характеристик зависит количество резцов, одновременно участвующих в разрушении массива, а также начало и длительность формирования нагрузки на каждом резце. Поэтому необходимо составить математическую модель оценки контактирования резца с разрушаемым массивом с учетом поверхности забоя, образованной предшествующими горизонтальными резами после зарубки вверх и после зарубки вниз.

Для определения контакта резца с забоем в режиме горизонтального реза была разработана расчетная схема (рис. 3).

На рис. 3 приняты следующие обозначения:

$M_p$  – часть массива, разрушенная предыдущим горизонтальным проходом;

$M$  – массив, подлежащий разрушению;

1-2 и 3-4 – отрезки, на которых расположены центры окружностей, ограничивающих боковую поверхность (куток забоя) разрушенного массива после  $j$ -го бокового реза предыдущего цикла;

$O'_n$  и  $R_n$  – центр и радиус окружности, ограничивающей поверхность забоя для этого резца после  $j$ -го бокового реза предыдущего цикла;

$\beta_{1j}, \beta_{2j}$  и  $\alpha_j$  – углы предельного положения стрелы в горизонтальной плоскости и угол ее подъема при реализации  $j$ -го бокового реза;

$L_k$  – длина коронки проходческого комбайна по оси вращения.

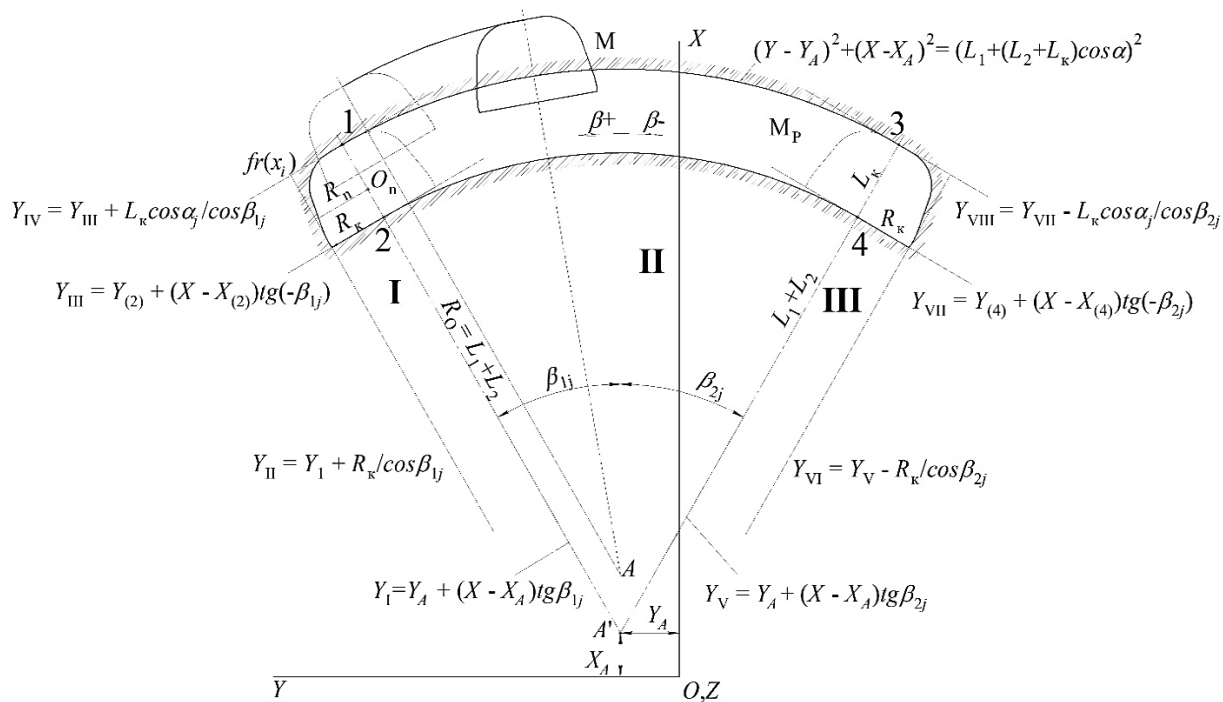


Рис. 3. Расчетная схема для определения контакта резца с забоем

Сечение тела вращения исполнительного органа при прохождении горизонтального реза частично повторяет форму коронки (заштрихованная область на рис. 4). Как видно из рис. 4, при фрезеровании исполнительный орган проходческого комбайна формирует горизонтальными резами в плоскости  $XOZ$  ограничивающую дугу радиусом  $(L_2 + L_k)$  в секторе, доступном стреле по оси  $Z$ .

На рис. 4 приняты следующие обозначения:

$\alpha_1, \alpha_2 (\alpha'_1, \alpha'_2, \alpha'_3, \alpha'_n)$  – угол подъема стрелы для  $j$ -го реза в рассматриваемом (предшествующем) цикле разрушения;

$A_0 (A)$  – положение оси поворотной турели в рассматриваемом (предшествующем) цикле обработки забоя;

$O_1, O_2 (O'_1, O'_2, O'_3, O'_n)$  – положения начала координат  $OXYZ$  в рассматриваемом (предшествующем) цикле при последовательной схеме обработки забоя.

Для оценки контактирования резца с забоем ограничивающая поверхность выработанного массива аппроксимируется поверхностями, образованными телами вращения при прохождении исполнительным органом проходческого комбайна горизонтальных резов с соответствующими углами подъема и поворота стрелы. В общем случае число таких поверхностей зависит от шага фрезерования.

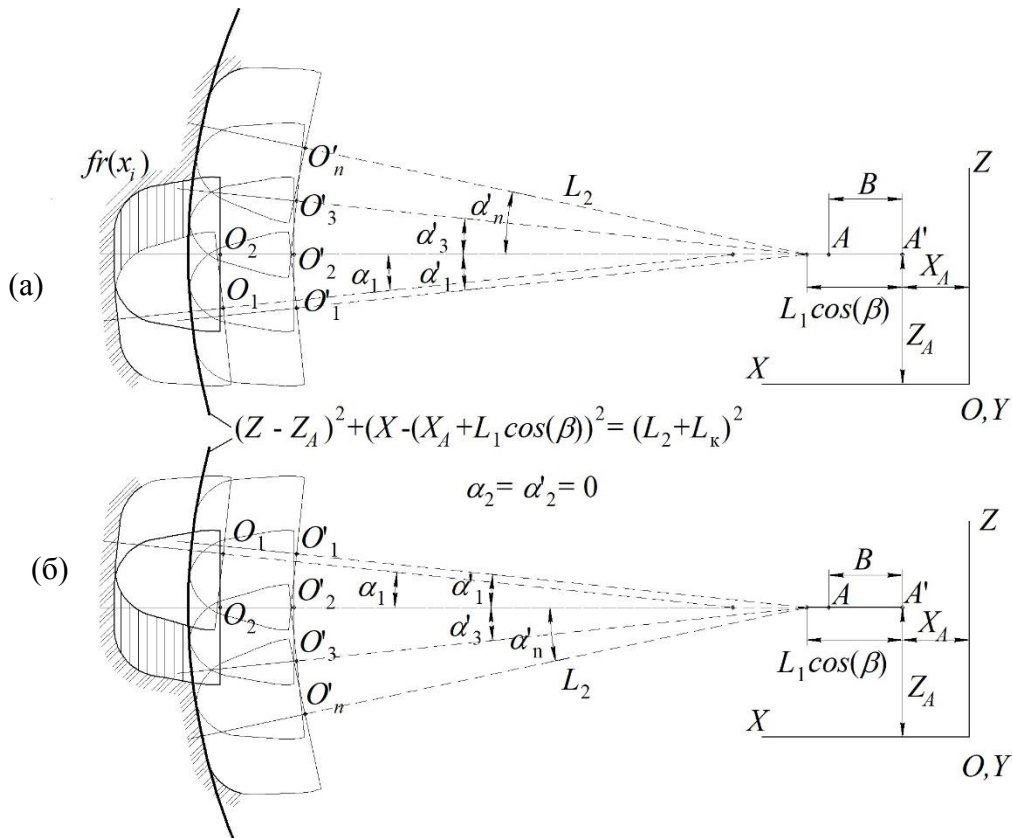


Рис. 4. Параметры задания поверхности забоя при боковом резе после зарубки вверх (а) и после зарубки вниз (б) (последовательная схема обработки)

Условие контакта резца с забоем в общем виде может быть записано следующим образом:

$$(X_i + X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2 + (Z_i - Z_0)^2 \geq R^2, \quad (6)$$

где  $(X_0, Y_0, Z_0)$  – координаты центра ограничивающей сферической поверхности радиусом  $R$ .

С учетом ограничений на основании расчетных схем, приведенных на рис. 3 и 4, составлена математическая модель определения логического состояния (0; 1) признака контактирования  $i$ -го резца при  $j$ -м горизонтальном проходе с разрушаемым массивом:

$$\left. \begin{array}{l}
j = \overline{1, n} \\
\text{Сектор II:} \\
Y_I = Y_A + (X_{ij} - X_A) \operatorname{tg} \beta_{1j}; Y_V = Y_A + (X_{ij} - X_A) \operatorname{tg} \beta_{2j}; \\
\text{если } (Y_V \leq Y_{ij} \leq Y_I), \text{ то} \\
\{\beta = \operatorname{arctg}((Y_{ij} - Y_A)/(X_{ij} - X_A)); R_1 = L_2 + L_K; \\
\alpha = \arcsin\left(\frac{Z_{ij}}{L_2 + L_K}\right); \varphi_{\Delta H} = \arccos\left(\frac{R_K - \Delta H}{R_K}\right); R_2 = L_1 + (L_2 + L_K) \cos \alpha; \\
Z_K(X_{ij}) = \begin{cases} \frac{(X_{ij} - X_{(k-1, j-1)})(Z_{(k, j-1)} - Z_{(k-1, j-1)})}{(X_{(k, j-1)} - X_{(k-1, j-1)})} + Z_{(k-1, j-1)} \\ \text{для } k \in [2, n], X_{(k-1, j-1)} \leq X_{ij} < X_{(k, j-1)} \end{cases} \\
\text{go to M1}\} \\
\\
\text{Сектор I:} \\
Y_{II} = Y_I + R_K / \cos \beta_{1j}; Y_{III} = Y_{(2)} + (X_{ij} - X_{(2)}) \operatorname{tg}(-\beta_{1j}); \\
Y_{IV} = Y_{III} + L_K \cos \alpha_j / \cos \beta_{1j}; \\
\text{если } (Y_{II} < Y_i < Y_{III}) \wedge (Y_{III} < Y_i < Y_{IV}), \text{ то} \\
\{x_R = ((X_i - X_{(2)}) / \cos \beta_{1j} + (Y_i - Y_A - (X_i - X_A) \operatorname{tg} \beta_{1j}) \sin \beta_{1j}) / \cos \alpha_j; \\
X_{(2)} = X_A + (L_1 + L_2 \cos \alpha_j) \cos \beta_{1j}; Y_{(2)} = Y_A + (L_1 + L_2 \cos \alpha_j) \sin \beta_{1j}; \\
X_{O_j} = X_{(2)} + x_R \cos \alpha_j \cos \beta_{1j}; Y_{O_j} = Y_{(2)} + x_R \cos \alpha_j \sin \beta_{1j}; \\
Z_{O_j} = Z_A + (L_2 + x_R) \sin \alpha_j; R = Y_K(x_R); \text{ go to M2}\} \\
\\
\text{Сектор III:} \\
Y_{VI} = Y_V - R_K / \cos \beta_{2j}; Y_{VII} = Y_{(4)} + (X_{ij} - X_{(4)}) \operatorname{tg}(-\beta_{2j}); \\
Y_{VIII} = Y_{VII} - L_K \cos \alpha_j / \cos \beta_{2j}; \\
\text{если } (Y_{VI} < Y_i < Y_V) \wedge (Y_{VIII} < Y_i < Y_{VII}), \text{ то} \\
\{x_R = ((X_i - X_{(4)}) / \cos \beta_{2j} + (Y_i - Y_A - (X_i - X_A) \operatorname{tg} \beta_{2j}) \sin \beta_{2j}) / \cos \alpha_j; \\
X_{(4)} = X_A + (L_1 + L_2 \cos \alpha_j) \cos \beta_{2j}; Y_{(4)} = Y_A + (L_1 + L_2 \cos \alpha_j) \sin \beta_{2j}; \\
X_{O_j} = X_{(4)} + x_R \cos \alpha_j \cos \beta_{2j}; Y_{O_j} = Y_{(4)} + x_R \cos \alpha_j \sin \beta_{2j}; R = Y_K(x_R); \\
Z_{O_j} = Z_A + (L_2 + x_R) \sin \alpha_j; \text{ go to M2}\} \\
\\
\text{M1: Если } \begin{cases} (X_{ij} - (X_A + L_1 \cos \beta))^2 + (Z_{ij} - Z_A)^2 \geq R_1^2, \\ (X_{ij} - X_A)^2 + (Y_{ij} - Y_A)^2 \geq R_2^2, \\ Z_K(X_{ij}) \geq Z_K(X_{ij-1}), \\ 0 \leq \varphi_{ij} \leq \varphi_{\Delta H_j}, \end{cases} \\
\text{то } a = 1, j = j + 1, \text{ иначе } a = 0, j = n \\
\text{M2: Если } (X_{ij} - X_{O_j})^2 + (Y_{ij} - Y_{O_j})^2 + (Z_{ij} - Z_{O_j})^2 \geq R^2, \\
\text{то } a = 1, j = j + 1, \text{ иначе } a = 0, j = n.
\end{array} \right\} \quad (7)$$

В интегрированном виде математическая модель определения величины  $\alpha$  запишется как

$$\alpha = \bar{F}_{\text{кр}}(\bar{X}_i, \bar{P}_{\text{кр}}), \quad (8)$$

где  $\alpha$  – величина признака контактирования резца с разрушаемым массивом (при  $\alpha = 1$  резец контактирует с забоем, при  $\alpha = 0$  не контактирует);

$\bar{F}_{кр}$  – вектор-функция определения величины признака контактирования резца с массивом;

$\bar{P}_{кр}(L_{ст}, R_0, R_k, fr(x), N_n, \beta_{1n}, \beta_{2n}, \alpha_n, X_{An}, Y_{An}, Z_{An}, n = \overline{1, N_n})$  – вектор параметров для оценки условия контактирования резца с массивом.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ МАССИВА РЕЗЦАМИ КОРОНКИ

Резцовый исполнительный орган разрушает забой резцами в определенной последовательности, в результате чего образуется схема стружкообразования, определяющая параметры среза – толщину стружки  $h_i$  и шаг резания  $t_i$  – на каждом резце, контактирующем с забоем. Для их определения необходимо знать траектории движения резцов, образующих забой для рассматриваемого  $i$ -го резца (всего  $n_p$  резцов на коронке).

Для разработки математической модели определения толщины и ширины среза для осевой коронки в процессе разрушения массива были приняты следующие исходные положения [4]:

толщина среза резца определяется как расстояние до поверхности разрушаемого массива, формируемой резцами опережающей лопасти в сечении забоя плоскостью, проходящей через вершину резца и ось вращения коронки;

ширина среза резца определяется как расстояние между вершиной резца и вершиной опережающего резца (находящегося на соседних линиях резания) в сечении забоя плоскостью проходящей через его вершину и ось вращения коронки.

С учетом этих принятых положений была разработана расчетная схема для определения параметров среза – толщины и ширины – на каждом резце (рис. 5). На схеме показаны:

$OXYZ$  – неподвижная система координат, жестко связанная с забоем;

$OX'Y'Z'$  – неподвижная система координат, совпадающая с положением системы  $OXYZ$  при ее повороте вокруг оси  $OZ$  на угол поворота стрелы в горизонтальной плоскости;

$O_{кхуз}$  – система координат, жестко связанная с осью вращения коронки, оси которой параллельны осям системы координат  $OX'Y'Z'$ ;

$A_i-A_i$  – сечение забоя в рассматриваемой момент времени плоскостью, проходящей через вершину  $i$ -го резца и ось вращения коронки;

$O_{крx}$  – система координат, задающая положение  $i$ -го резца и резцов, формирующих поверхность забоя в сечении  $A_i-A_i$  и определяющих параметры среза;

$L_i$  – лопасть коронки, на которой установлен  $i$ -й и опережающий резец в соседней линии резания;

$L'_i$  – опережающая лопасть, на которой установлены резцы, формирующие поверхность забоя для  $i$ -го резца в сечении  $A_i-A_i$ ;

$a_0$  и  $a_0'$ ,  $b_0'$  – положения вершины опережающего резца и резцов, формирующих поверхность забоя для этого резца в опережающей лопасти в рассматриваемый момент времени;

$a$  и  $a'$ ,  $b'$  – положения вершин резцов, формирующих поверхность забоя для  $i$ -го резца в сечении  $A_i-A_i$ ;

$r_i, R_{1i}, R_{2i}, R_{3i}$  и  $x_i, X_{1i}, X_{2i}, X_{3i}$  – координаты вершин  $i$ -го резца и резцов, формирующих поверхность забоя в сечении  $A_i-A_i$ ;



$h_i$ ,  $t_i$  и  $\delta_i$  – толщина, ширина среза  $i$ -го резца и угол наклона поверхности забоя к оси  $Or$  в сечении  $A_i$ - $A_i$ ;

$\varphi_i$ ,  $\varphi_{ki}$ ,  $\Delta\varphi_p$  и  $\Delta\varphi_l$  – угол положения  $i$ -го резца, угол  $i$ -го поворота коронки, разность углов установки соседних резцов лопасти и угол сдвига лопастей коронки соответственно;

$f(r)$  и  $\psi(r)$  – зависимости для задания боковой поверхности коронки и углов смещения резцов на лопастях;

$\alpha$  и  $\beta$  – угол подъема стрелы и ее поворота в горизонтальной плоскости в рассматриваемый момент времени;

$\omega_k$ ,  $\omega_\beta$  – соответственно угловые скорости вращения коронки и поворота стрелы в горизонтальной плоскости;

$V_p$  и  $V_{xi}$ ,  $V_{yi}$ ,  $V_{zi}$  – скорость резания и составляющие скорости подачи  $i$ -го резца в системе координат  $OXYZ$  в рассматриваемый момент времени.

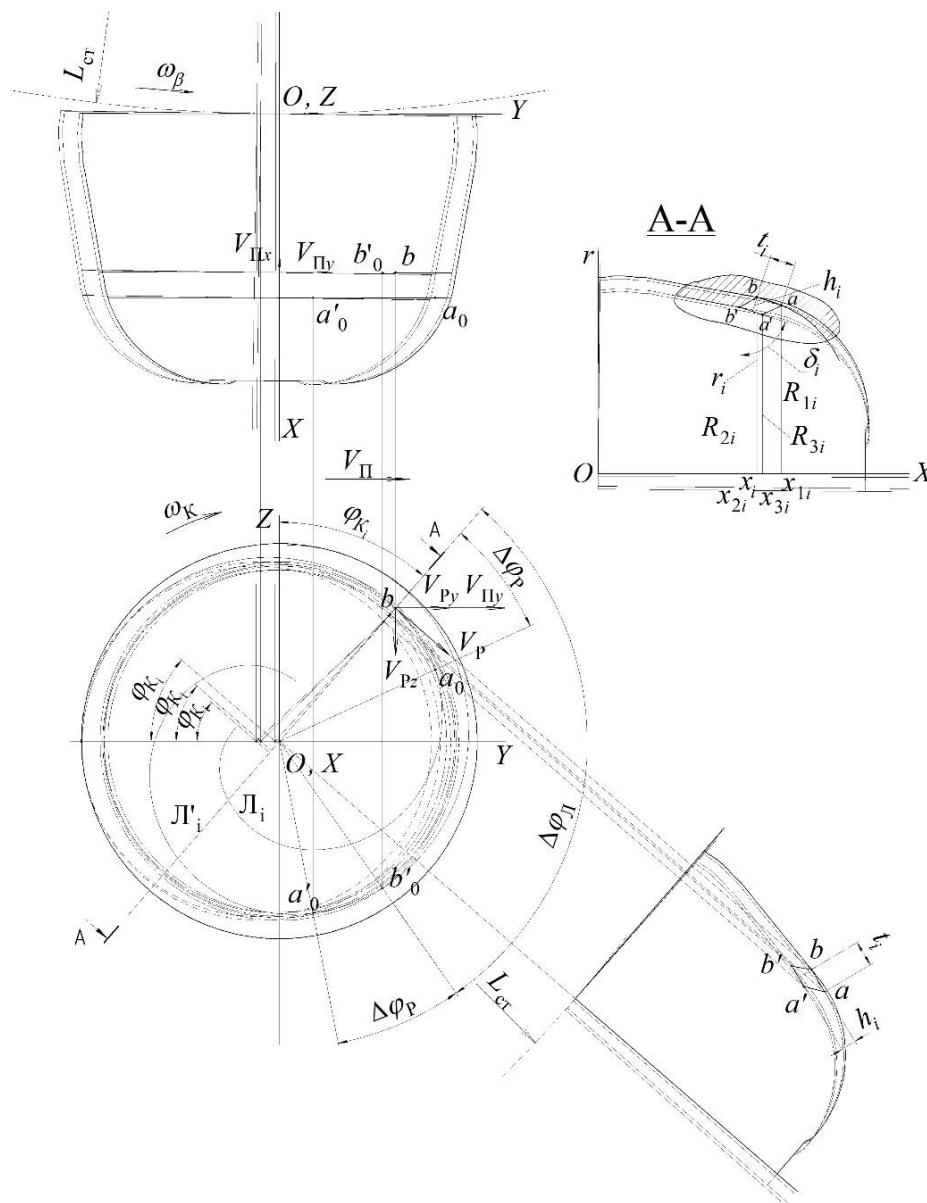


Рис. 5. Расчетная схема для определения параметров стружкообразования

С учетом приведенной выше расчетной схемы математическая модель определения параметров процесса разрушения массива резцами осевой коронки в режиме бокового реза может быть представлена в виде:

$$\left[ \begin{array}{l} i \in [1, N-1] \\ L_3 = L_1 + L_2 \cos \alpha; \omega_\beta = \frac{V_{\text{п}}}{60(L_1+L_2)}; V_{\text{пр}} = \omega_\beta L_3; t_{\text{об}} = 60/\omega_\kappa; \\ \text{для } \varphi_{i+1} < \varphi_i: \varphi_{i+1} = 2\pi + \varphi_{i+1}; \text{ для } \varphi'_i < \varphi_i: \varphi'_i = 2\pi + \varphi'_i; \\ \Delta\varphi_p = \varphi_{i+1} - \varphi_i; \Delta\varphi_\lambda = \varphi'_i - \varphi_i; \\ t_{\text{стр}} = \begin{bmatrix} t_{\text{об}} \cdot \Delta\varphi_p / 2\pi \\ t_{\text{об}} \cdot \Delta\varphi_\lambda / 2\pi \\ t_{\text{об}} \cdot (\Delta\varphi_p + \Delta\varphi_\lambda) / 2\pi \end{bmatrix}; \\ \\ k \in [1, 3] \\ l_{\text{стр}ki} = V_{\text{пр}} \cdot t_{\text{стр}k}; \beta_{\text{стр}ki} = 180 \cdot l_{\text{стр}ki} / \pi \cdot L_3; \\ R_{ki} = \sqrt{r_{ki}^2 - (L_3 \sin \beta_{\text{стр}ki} \cos \varphi_i)^2} - L_3 \sin \beta_{\text{стр}ki} \sin \varphi_i; \\ X_{ki} = x_{ki} - \sqrt{2(L_3)^2 - 2L_3^2 \cos \beta_{\text{стр}k} \sin \frac{\beta_{\text{стр}k}}{2}}; \\ \\ t_i = \sqrt{(r_i + R_{1i})^2 + (X_i + X_{1i})^2}; \delta_i = \arccos \left( \frac{R_{2i} - R_{3i}}{\sqrt{(R_{2i} - R_{3i})^2 + (X_{2i} - X_{3i})^2}} \right); \\ h_i = (r_i - R_{3i}) \sin \delta_i + (x_i - X_{3i}) \cos \delta_i; S = h_i \cdot t_i; \\ \begin{bmatrix} V_{X_i} \\ V_{Y_i} \\ V_{Z_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -((L_1 + (L_2 + x_i) \cos \alpha) \cos \beta) \cdot \omega_\beta \cdot \sin \beta \\ ((L_1 + (L_2 + x_i) \cos \alpha) \cos \beta) \cdot \omega_\beta \cdot \sin \beta + r_i \omega_\kappa \cos \varphi_i \\ -r_i \omega_\kappa \sin \varphi_i \end{bmatrix}. \end{array} \right. \quad (9)$$

В интегрированном виде математическая модель определения параметров процесса разрушения массива аксиальной коронкой как ФЗЭ запишется как

$$\bar{Y}_p = \bar{F}_p(\bar{X}_p(\bar{Y}_{\text{сн}}, \bar{R})), \quad (10)$$

где  $\bar{Y}_p = (h_i, t_i, i = \overline{1, N_1})$  – выходной вектор параметров процесса разрушения массива резцами осевой коронки;

$\bar{F}_p$  – вектор функция определения параметров процесса разрушения массива резцами лопасти осевой коронки;

$\bar{X}_p(\bar{Y}_{\text{сн}}, \bar{R})$  – входной вектор, компонентами которого являются схема набора резового инструмента коронки  $\bar{Y}_{\text{сн}}$  и вектор параметров режима ее работы  $\bar{R}(L_1, \alpha, \beta, \omega_\kappa, V_{\text{п}}, \omega_\beta)$ ;

Зависимости (1), (2), (8), (9) являются составными частями комплексной математической модели формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕКТОРА  
ВНЕШНЕГО ВОЗМУЩЕНИЯ НА ОСЕВОЙ КОРОНКЕ  
КАК ФУНКЦИОНАЛЬНО ЗАКОНЧЕННЫЙ ЭЛЕМЕНТ**

Путем объединения приведенных выше зависимостей можно составить комплексную математическую модель формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке (11).

$$\left\{ \begin{array}{l} m_i = \bar{F}_M(\bar{X}_i(X_i, Y_i, Z_i), \bar{P}_M), \\ \bar{X}_i = \bar{F}_{пр}(\bar{X}_{пр}, \bar{P}_{сн}). \\ \text{Условие контакта резца:} \\ \text{Если } \begin{cases} (X_{ij} - (X_A + L_1 \cos \beta))^2 + (Z_{ij} - Z_A)^2 \geq R_1^2; \\ (X_{ij} - X_A)^2 + (Y_{ij} - Y_A)^2 \geq R_2^2; \\ Z_{ij} \geq Z_K(X_{ij}). \end{cases} \\ \text{Если } (X_{ij} - X_{O_j})^2 + (Y_{ij} - Y_{O_j})^2 + (Z_{ij} - Z_{O_j})^2 \geq R^2, \\ \text{то } a = 1, j = j + 1, \text{ иначе } a = 0, j = n; \\ \{h_i, t_i\} = \bar{F}_p(\bar{X}_p(\bar{Y}_{сн}, \bar{R})), \\ \{Z_i, Y_i\} = F_1(P_{zi}, P_{yi}, \bar{r}_i), \\ \{\bar{P}_M, \bar{M}_M\} = F_2(Z_i, Y_i), \end{array} \right. \quad (11)$$

где  $F_{пр}$  – вектор-функция расчета положения резца;

$F_1$  – вектор-функция расчета мгновенных значений усилия на резце;

$F_2$  – вектор-функция расчета вектора внешнего возмущения на коронке.

**ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

Адекватность математической модели оценивалась путем сравнения интегральных показателей, отражающих эффективность процесса разрушения горного массива, а именно: средней мощности на разрушение за цикл, теоретической производительности, удельных энергозатрат за цикл, длительности обработки забоя.

При проведении модельного эксперимента по послойному разрушению забойного пространства принимались следующие допущения:

исполнительный орган проходческого комбайна движется строго по заданной траектории без учета переборов в связи с тем, что при определении теоретической производительности в ходе обработки экспериментальных данных площадь выработки принималась по паспорту выработки;

крепость породы и угля не изменяется в пределах прослойка и соответствует принятым значениям.

На рис. 6 приведена структура проходческого забоя, принятого при моделировании.

Расчетные значения показателей эффективности работы проходческого комбайна за цикл обработки забоя определены на основе разработанной математической модели при исходных данных, соответствующих условиям шахтного эксперимента (табл. 1) [1].

В качестве исходных данных для сравнения с результатами моделирования принимались экспериментальные данные, соответствующие циклу разрушения забоя со смещением комбайна в пределах коридора  $\pm 50$  мм. На рис. 7 приведены данные

циклов разрушения при шахтном эксперименте [1] в порядке убывания теоретической производительности за цикл.

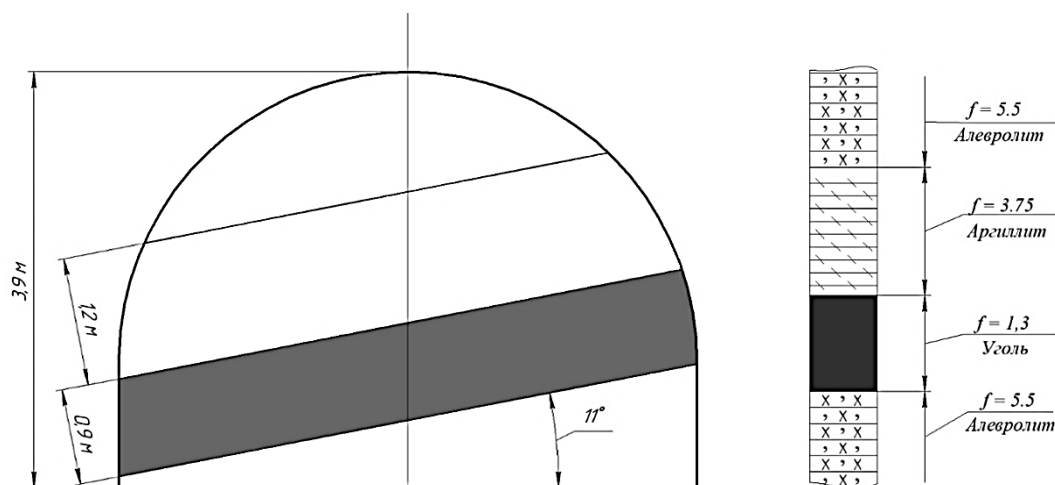


Рис. 6. Структура пород проходческого забоя для математического моделирования

Таблица 1. Исходные данные для расчета показателей эффективности проходческого комбайна

Наименование параметра	Значение
Глубина зарубки $B$ , м	0,325
Шаг фрезерования $\Delta H$ , м	0,4
Контактная прочность прослоек (см. рис. 6) $p_k$ , МПа (снизу вверх)	570; 65; 320; 570
Площадь выработки $S$ , м <sup>2</sup>	17,8
Номинальная мощность двигателя исполнительного органа, кВт	132
Смещение ПК относительно продольной оси, м	0

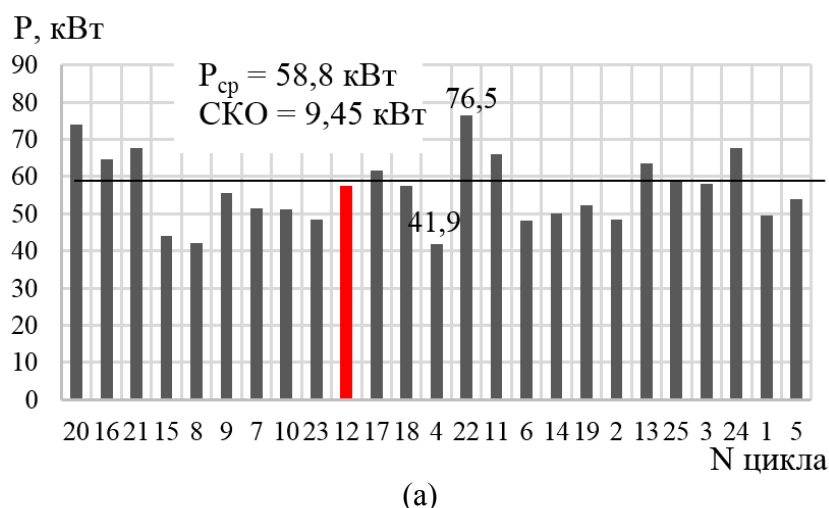
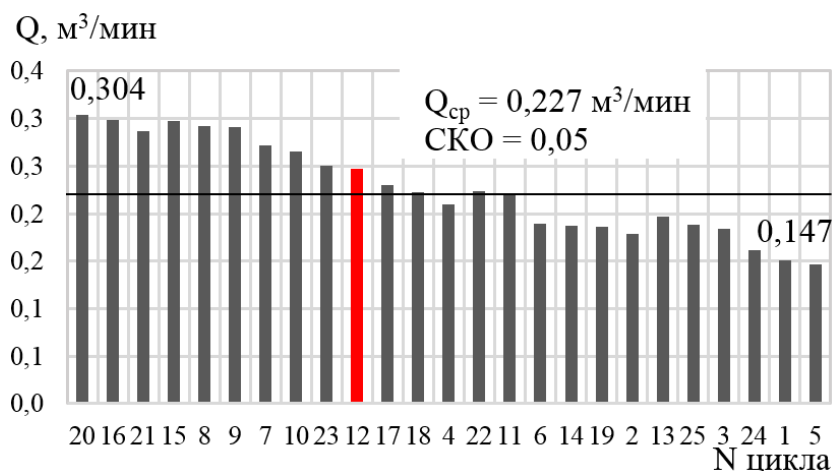
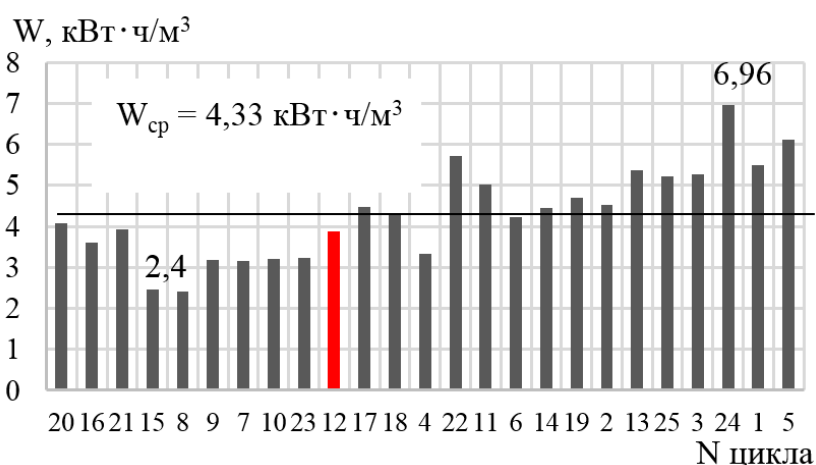


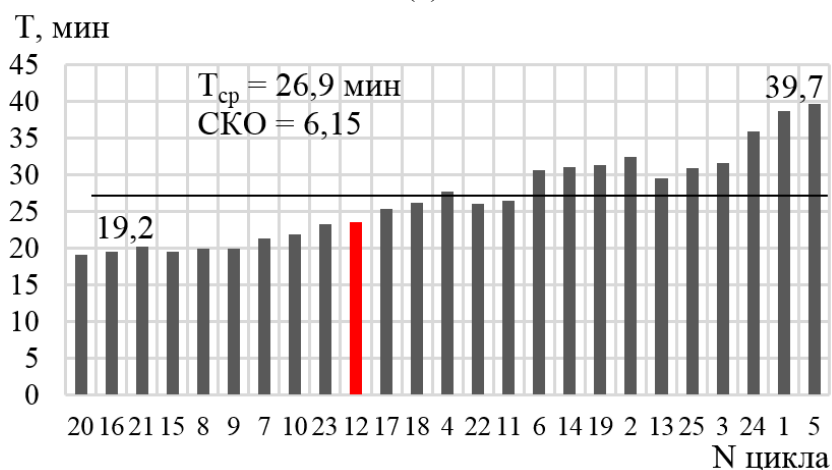
Рис. 7. Показатели эффективности разрушения забоя проходческим комбайном при шахтном эксперименте: мощность (а); производительность (б); удельные энергозатраты (в); время цикла разрушения (г)



(б)



(в)



(г)

Рис. 7. Продолжение

Моделирование производилось путем просчета послойного разрушения забоя горизонтальными резами в соответствии с методикой, описанной в [2] для нулевого смещения. В табл. 2 приведены показатели эффективности работы проходческого комбайна, полученные в результате модельного эксперимента для указанных выше условий, и соответствующие средние показатели по циклам 16, 20 и 21 (максимальная

производительность), полученные в результате обработки данных шахтного эксперимента и соответствующие нулевому смещению комбайна относительно продольной оси выработки.

Таблица 2. Сравнение показателей эффективности работы проходческого комбайна при шахтном и модельном экспериментах

Показатель	Данные шахтного эксперимента	Данные модельного эксперимента	Отклонение результатов, %
$P$ , кВт	68,8	79,0	14,8
$Q$ , м <sup>3</sup> /мин	0,297	0,314	5,7
$W$ , кВт·ч/м <sup>3</sup>	3,9	4,2	7,7
$T_{ц}$ , мин	19,6	20,9	6,6

Расхождение результатов моделирования и экспериментальных данных не превышает  $\pm 15\%$ , что подтверждает адекватность разработанной математической модели формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке. Таким образом, разработанная математическая модель может быть использована для выполнения теоретических исследований по установлению закономерностей рабочего процесса разрушения забоя исполнительным органом с осевой коронкой и определению влияния горно-геологических, горнотехнических факторов, конструктивных и режимных параметров проходческого комбайна на показатели эффективности его работы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана комплексная математическая модель формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке, учитывающая влияние горно-геологических условий, геометрических параметров исполнительного органа и схемы набора режущего инструмента, а также режимных параметров работы комбайна на процесс разрушения горного массива. Схема состоит из математических моделей разрушаемого массива и поверхности забоя, математической модели определения координат резца в системе координат выработки, математической модели для определения параметров процесса разрушения массива резцами коронки (усилий резания и подачи на резце), учитывающей условие наличия контакта резца с забоем.

2. Установлена адекватность разработанной математической модели формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке проходческого комбайна. При модельном и шахтном экспериментах максимальное расхождение результатов сравнения интегральных показателей эффективности разрушения забоя проходческим комбайном не превысило  $\pm 15\%$ . Разработанная математическая модель может быть использована для выполнения теоретических исследований по установлению закономерностей рабочего процесса разрушения забоя исполнительным органом с осевой коронкой и с учетом влияния горно-геологических, горнотехнических факторов, конструктивных и режимных параметров проходческого комбайна на показатели эффективности его работы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шабает О.Е., Довгань А.Ю. Экспериментальные исследования нагрузочных характеристик двигателя привода исполнительного органа проходческого комбайна КСП-35 в представительных условиях его эксплуатации // *Вестник ДонНТУ*. 2018. № 4. С. 34–40.

2. Шабаев О.Е., Довгань А.Ю. Влияние позиционирования проходческого комбайна КСП-35 в проходческом забое на эффективность его функционирования // *Вестник ДонНТУ*. 2020. № 3 (21). С. 35–42.
3. Семенченко А.К., Шабаев О.Е., Семенченко Д.А., Хиценко Н.В. Математическая модель вектора внешнего возмущения на аксиальной коронке проходческого комбайна // *Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-електромеханічна*. 2006. Вип. 104. С. 198–205.
4. Шабаев О.Е., Бридун И.И., Хиценко Н.В. Техническая диагностика режущего исполнительного органа проходческого комбайна / под общ. ред. О.Е. Шабаева. Донецк: ООО «Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ»», 2015. 200 с.
5. Кондрахин В.П., Хиценко А.И. Идентификация усилия резания горных пород // *Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-електромеханічна*. 2001. Вип. 35. С. 38–47.
6. Семенченко Д.А. Влияние кинематических изменений заднего и переднего углов поворотного резца на формирование усилия подачи // *Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-електромеханічна*. 2001. Вип. 27. С. 340–344.
7. Кондрахин В.П. Имитационная модель процесса разрушения породы рабочими органами породоразрушающих машин: сборник научных трудов Национальной горной академии Украины. Днепропетровск: НГАУ, 1998. Т. 6. № 3. С. 33–38.
8. Горбатов П.А., Кондрахин В.П. Закономерности формирования толщины стружки, снимаемой резцом горного комбайна // *Известия вузов. Горный журнал*. 1991. № 10. С. 75–78.
9. Бойко Н.Г. Рациональная ширина среза и схема набора режущего инструмента исполнительных органов комбайнов для тонких пластов // *Известия вузов. Горный журнал*. 1983. № 2. С. 76–79.
10. Кондрахин В.П., Гуляев В.Г., Горбатов П.А. О влиянии пространственных колебаний исполнительных органов комбайнов на измельчение угля // *Уголь Украины*. 1996. № 4. С. 37–39.
11. Гуляев В.Г., Семенченко Д.А. Определение удельных энергозатрат и вектора внешнего возмущения корончатого исполнительного органа проходческого комбайна в различных режимах обработки забоя // *Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-електромеханічна*. 2001. Вип. 35. С. 38–47.
12. Семенченко Д.А. Влияние формы аксиальной коронки на формирование толщины стружки на резцах и энергозатраты разрушения при боковом резе. *Перспективы развития угольной промышленности в XXI веке: Сборник научных трудов, посвященный 45-летию ДГМИ*. Алчевск: ДГМИ, 2002. С. 268–273.
13. Кондрахин В.П., Хиценко А.И. Имитационное моделирование усилий резания и подачи при резании горных пород // *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2010. № 2. С. 150–154.
14. Красникова О.Ю., Гусева И.М. К вопросу повышения динамической устойчивости проходческого комбайна со стреловидным исполнительным органом. *Процессы и средства разрушения угля и горных пород: науч. сообщения*. М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1987. С. 77–81.
15. Хургин З.Я., Крыловский А.Л. Имитационная модель формирования нагруженности проходческого комбайна избирательного действия // *Научно-технические вопросы комплексной механизации горнопроходческих работ*. 1981. Вып. 202. С. 60–65.
16. Горбатов П.А., Кондрахин В.П. Закономерности формирования внешней нагрузки на исполнительном органе и динамические характеристики горного комбайна // *Известия вузов. Горный журнал*. 1991. № 3. С. 81–95.

**Для цитирования:** Шабает О.Е., Довгань А.Ю. Математическая модель формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке исполнительного органа проходческого комбайна // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2024. № 2 (22). С. 55–72.

## **A MATHEMATICAL MODEL OF THE FORMATION OF AN EXTERNAL DISTURBANCE VECTOR ON THE AXIAL CROWN OF A BOOM-TYPE HEADING MACHINE**

O.E. SHABAEV<sup>1</sup>, Dr. Sc, A.Yu. DOVGAN<sup>1, 2</sup>, postgraduate

<sup>1</sup>Donetsk National Technical University,

58, st. Artema, 283001, Donetsk, e-mail: donntu.info@mail.ru

<sup>2</sup>Mine Automation Research Institute named after V.A. Antipov,  
93, Plycha ave., 283003, Donetsk, e-mail: avtomatgormash@mail.ru

A complex model of the formation of an external disturbance vector on the axial crown of the executive body has been developed, taking into account the influence of mining and geological conditions and operating parameters of the combine on the process of destruction of the mountain range, which consists of models of the destroyed array and the face surface, finding the coordinates of the tip of the cutter in the face, evaluating the conditions of contact of the cutter with the array, determining the parameters of the process of destruction of the array by cutters crowns for determining the cutting and feeding forces on the cutter, taking into account the fulfillment of the contact condition of the cutter with the face. The adequacy of the mathematical model was assessed by comparing the indicators obtained during model and experimental studies: average fracture power per cycle, theoretical productivity, specific energy consumption per cycle, and the duration of face treatment.

*Keywords:* mathematical model, heading machine, cutter, boom, external disturbance vector.

Поступила в редакцию/received: 26.02.2024; после рецензирования/revised: 28.02.2024;  
принята/accepted: 01.03.2024

УДК 622.331:622.271

## **ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ**

Е.Ю. ЧЕРТКОВА, канд. техн. наук

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

© Черткова Е.Ю., 2024

Рассмотрены вопросы управления качеством торфяного сырья. Разработана технология добычи фрезерного торфа с интенсификацией сушки в полевых условиях до уборочной влажности менее 40 % за счет переменной высоты общего слоя, что



позволяет управлять качеством добываемого сырья и снизить энергоемкость процесса его переработки. Проведены полевые испытания данной технологии на торфяном месторождении. Определены показатели относительной влажности убираемой торфяной крошки в каждом цикле по двум технологиям. Приведены результаты сравнительного анализа эксплуатационной производительности машин с учетом разных технологических параметров добычи.

*Ключевые слова:* фрезерный торф, качественные параметры, интенсификация, сушка торфа, глубина фрезерования, переработка, влажность, цикловые сборы, эксплуатационная производительность.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-2-72-80**

## **ВВЕДЕНИЕ**

В горнодобывающей промышленности большое внимание уделяется подходам, позволяющим обеспечивать высокие качественные характеристики добываемого сырья на этапе геотехнологии, что, в свою очередь, способствует значительному сокращению расходов на последующие высокотехнологические процессы переработки торфа в заводских условиях.

К качественным характеристикам торфяного производства относят такие показатели, как влажность и зольность, которые регламентируются нормативными документами [1–3] и определяют качество торфяной залежи. Зольность обусловлена природными характеристиками торфяного месторождения, а уборочная влажность торфа зависит от направления использования торфяной продукции и выбранного способа добычи.

В технологиях добычи фрезерного торфа, применяемых в России и в ряде зарубежных стран, его высушивают до уборочной влажности от 45 до 65 %, в зависимости от направления дальнейшего использования [4]. Например, в торфобрикетной промышленности для получения 1 т брикетов из исходного сырья требуется удалить около 0,5 т воды [5], что связано с большими затратами тепловой энергии. При глубокой химической переработке торфяной крошки для производства гидрофобных добавок [6] требуется высокое температурное воздействие на сырье, которое негативно влияет на групповой химический состав и приводит к потере органических компонентов [7]. Важной задачей технологии добычи крошкообразного торфяного сырья является снижение его уборочной влажности в естественных условиях до минимальных значений.

В связи с вышеперечисленным цель работы заключалась в разработке технологического метода добычи фрезерного торфа с увеличением интенсивности сушки в полевых условиях, что позволит максимально снизить уборочную влажность и сохранить ряд ценных органических компонентов сырья. С целью оценки технологического метода проведена исследовательская работа на площадях торфяного месторождения.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Для решения поставленной задачи в исследовательской работе проведен анализ технологических подходов к процессу интенсификации естественной сушки торфа в полевых условиях. Теорией полевой сушки фрезерного торфа занимались В.Я. Антонов, Л.М. Малков, А.Е. Афанасьев, В.И. Смирнов, Н.И. Гамаюнов и другие известные специалисты в области торфяного производства [8–11]. Полевая сушка

фрезерного торфа является существенной операцией технологического процесса добычи торфа. Режим полевой сушки торфа зависит от ряда факторов [12–14]:

метеорологических – осадков, интенсивности солнечной радиации, относительной влажности, температуры воздуха, облачности;

физических – ботанический состав, степень разложения, влагоемкость и пр.;

гидрогеологических – уровня грунтовых вод, способов осушения торфяной залежи и др.;

технологических – характера и очередности технологических операций, начального и конечного влагосодержания, толщины сушимого слоя и пр.

Перечисленные факторы взаимосвязаны и влияют друг на друга.

В разработанной технологии были учтены основные элементы интенсификации сушки торфа на торфяных полях.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Научно-исследовательская работа выполнялась на специально предоставленной технологической площадке, расположенной рядом с полями добычи на торфяном месторождении в Псковской области, где торф добывается открытым способом. Это дало возможность сравнить преимущество рассматриваемой технологии с применяемой на данном предприятии. Объект исследования – производственный участок с одинаковыми качественными характеристиками торфяной залежи по всей площади. Тип залежи – верховой, пнистость менее 1 %, степень разложения – 29 %, естественная влажность – 83 %, эксплуатационная – 75 %.

Действующая технология добычи торфяной крошки включает следующие технологические операции: фрезерование торфяной залежи на глубину 9–15 мм, ворошение торфяной крошки и уборку торфа.

Разработанный технологический метод представлен аналогичными технологическими операциями, но с кондиционированием уборочной относительной влажности на технологических площадях за счет изменения глубины фрезерования и интенсификации сушки.

Основной технологической операцией по созданию слоя фрезерного торфа является фрезерование залежи (рис. 1).



(а)



(б)

Рис. 1. Вид залежи: в процессе фрезерования (а);  
после фрезерования (расстил) (б)

Глубина фрезерования в различных способах добычи торфа представлена изменяемым параметром [15]. В предложенной технологии операция фрезерования залежи выполняется фрезбарабаном после выпадения осадков на глубину 25–30 мм, обеспечивающую толщину слоя аэрации  $h_{сл} = 45–50$  мм (рис. 2).

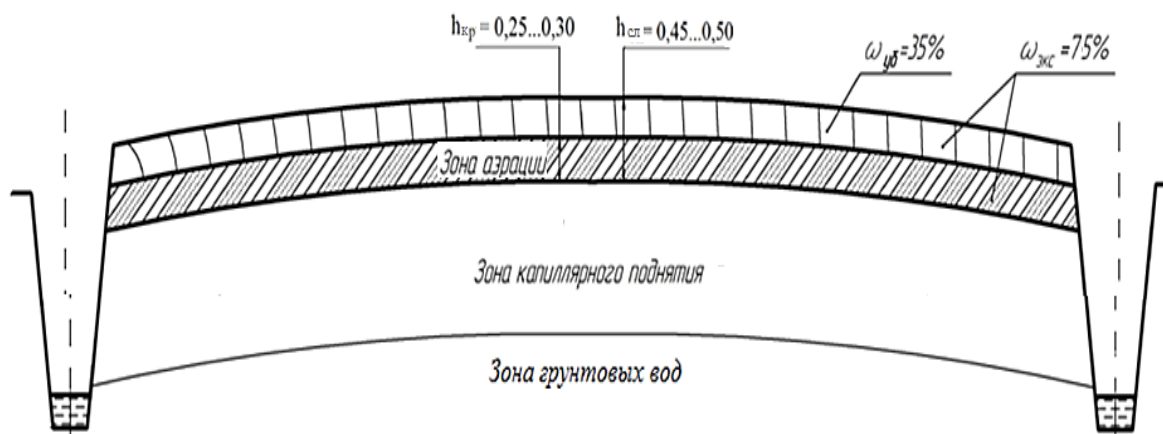


Рис. 2. Схематическое изображение торфяной залежи

В процессе фрезерования образуется минимальная (критическая) толщина слоя  $h_{кр} = 25–30$  мм. Во втором и последующих циклах фрезерные барабаны активного типа формируют из оставшейся фрезерной крошки на полях добычи и дополнительно нафрезерованной залежи слой глубиной не более 10–12 мм. В случае неустойчивых погодных условий толщина слоя может быть изменена, но всегда должна быть больше, чем критическая. Прерванный осадками технологический цикл сушки торфа восстанавливается рыхлением оставшейся несработанной части слоя ворошилками или фрезбарабанами.

Схема сушки фрезерного торфа включает в себя три слоя. Первый (верхний) слой – быстросохнущий; второй (средний) – с высокой интенсивностью испарения влаги; третий (нижний) слой торфа предотвращает влагообмен сфрезерованного слоя и торфяной залежи. Для верхового типа залежи он составляет около 30 мм (рис. 3). В процессе сушки зона испарения перемещается в глубь торфяной крошки в среднем на 25–30 мм, что вызывает интенсивную подсушку подстилающих верхних слоев торфа.

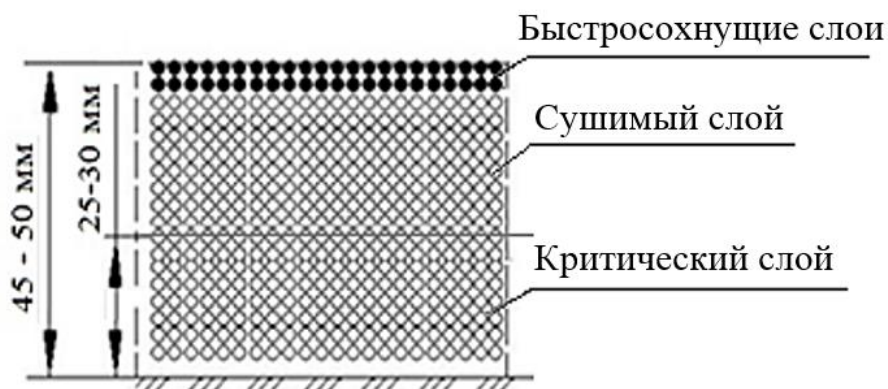


Рис. 3. Схема сушки многослойного расстила

При срабатывании сушимого слоя до минимальной (критической) толщины слоя начинает усиливаться тепло- и влагообмен с подстилающим слоем торфяной залежи [13], что вызывает снижение интенсивности полевой сушки, затрат тепловой энергии на испарение влаги. Происходит и отток тепла из сушимого слоя в монолит, и это приводит к снижению показателей сбора торфа. Критический слой предотвращает отрицательное влияние залежи на сушку торфяной крошки [8].

Последующая технологическая операция – ворошение (рис. 4). Для интенсификации сушки при хорошей категории сушки выполняется одно ворошение на глубину 20–25 мм при длительности цикла одни сутки. При средней и слабой категориях выполняется два ворошения [14].

Затем осуществляется послонная уборка подсохшего до кондиционной влажности не более 40 % верхнего тонкого слоя торфяной крошки машинами с пневматическим сбором.



Рис. 4. Расстил торфяной крошки после ворошения

Пневматическая уборка имеет ряд технологических преимуществ перед механическим способом, а именно [15, 16]:

улучшается качество торфяного сырья, так как в первую очередь засасываются более легкие частицы торфяной крошки с наименьшей влажностью;

при движении пневмоуборочной машины сопла перемещаются над расстилом, благодаря чему не происходит подфрезеровывание торфяной залежи и, следовательно, не повышается уборочная влажность торфа;

сокращается продолжительность цикла;

увеличиваются сезонные сборы.

При хороших погодных условиях верхний слой торфа убирают один или несколько раз в сутки. На экспериментальном участке уборка торфа производилась прицепной к трактору пневмоуборочной машиной МПГУ-30 (рис. 5).

Суть метода заключается в следующем. После уборки высушенного слоя до влажности не более 40 % технологический цикл заканчивается. Затем проводится следующий технологический цикл с образованием глубины слоя 40–45 мм, что достигается за счет фрезерования залежи на глубину 10–12 мм и оставшейся на карте подсохшей торфяной крошки от предыдущего цикла. После этого выполняется ворошение верхнего слоя и уборка высушенного до кондиционной уборочной влажности нового слоя.





Рис. 5. Пневмоуборочная машина МПТУ-30: общий вид (а); всасывающие сопла уборочной машины (б)

Для неустойчивых погодных условий для сушки предусматривается дифференцированная глубина фрезерования с целью получения расчетных цикловых сборов фрезерного торфа. При наиболее благоприятных климатических условиях отсутствует неубранный высушенный торф на площадях разрабатываемого участка. Следовательно, увеличится количество технологических циклов и сезонная выработка уборочных машин [15]. Кроме того, на повышение цикловых сборов оказывает большое влияние интенсивное удаление влаги из слоя благодаря улучшенной аэрации.

Определение относительной влажности убранной торфяной крошки на исследуемой площадке производилось в течение июля 2023 года, по данным среднее значение составило 33,9 %, в то время как на соседней карте, где добыча осуществлялась по действующему технологическому методу, уборочная влажность в среднем достигала 47 %.

Цикловой сбор при конечной влажности 33,9 % в разработанной технологии по произведенным расчетам составил 12,3 т/га и практически совпал с цикловым сбором, полученным по действующей технологии.

В ходе исследования были проанализированы эксплуатационные производительности машин на технологических операциях добычи, которые рассчитываются по выражению [12, 15]:

$$S = 0,1 \cdot v_T \cdot K_v \cdot b_k \cdot K_{ш} \cdot K_{п. в} \cdot K_{ц},$$

где  $v_T$  – расчетная скорость трактора, км/ч;

$K_v$  – коэффициент использования скорости;

$b_k$  – конструктивная ширина захвата рабочего органа;

$K_{ш}$ ,  $K_{п. в}$ ,  $K_{ц}$  – коэффициенты использования соответственно конструктивной ширины захвата, полезного времени работы машины, времени цикла.

На фрезеровании торфяной залежи скорости определялись по мощности двигателя трактора [17]. При уборке бункерными машинами с пневматическим сбором скорость рассчитывалась из условия сбора всего высушенного фрезерного торфа и проверялась по мощности двигателя трактора [17].

Результаты расчета эксплуатационной производительности машин приведен на гистограмме (рис. 6). Из полученных данных следует, что на операции фрезерования показатель выше на 18,7 % по действующему технологическому методу за счет меньшей толщины фрезеруемого слоя и более высокой скорости работы фрезбарабана, следовательно, выше коэффициент использования времени цикла по сравнению с испытываемой технологией.

Эксплуатационная производительность ворошилки по действующей на предприятии технологии на 7,6 % выше по сравнению с разработанным методом в связи с более высоким коэффициентом использования времени цикла. В то же время эксплуатационная производительность МПТУ-30 по разработанному технологическому методу выше на 8,2 %. Это обусловлено снижением массы торфа за счет понижения уборочной влажности торфяной крошки в естественных условиях до минимального значения.

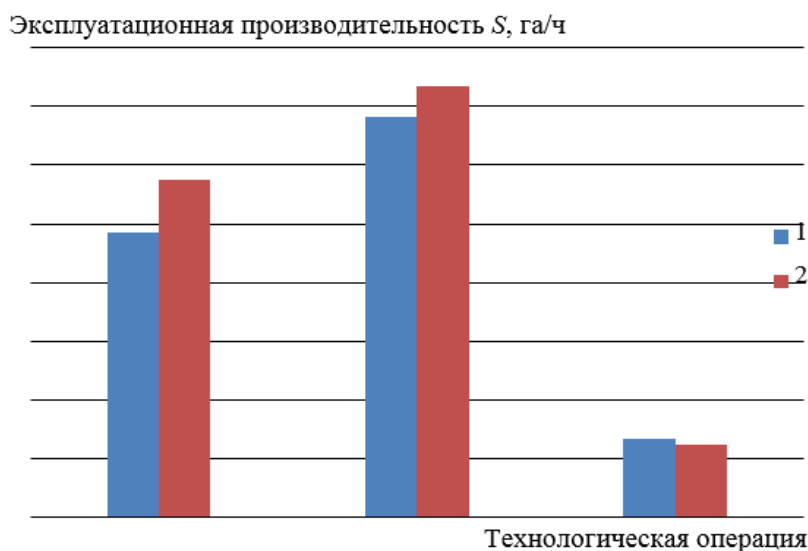


Рис. 6. Эксплуатационная производительность машин на технологических операциях: разработанный (1) и действующий (2) технологические методы

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные на торфяном месторождении исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Испытан предложенный технологический метод добычи фрезерной торфяной крошки с кондиционированием по влажности для применения в качестве топливного торфа, брикетов и сырья для глубокой химической переработки. Разработанная технология добычи торфа с интенсификацией сушки в толстых слоях позволяет управлять качественными параметрами торфяного сырья и уменьшить продолжительность искусственной досушки.

2. Оценены показатели уборочной влажности торфяной крошки. На исследуемом участке торфяного месторождения показатель конечной влажности ниже на 38,6 %.

3. В случае неблагоприятных климатических условий предусмотрена дифференцированная глубина фрезерования, что способствует сохранению цикловых сборов на уровне действующих норм технологического проектирования.

4. Проведен сравнительный анализ эксплуатационной производительности машин с учетом разных технологических параметров добычи, который показал, что производительность машин ниже на фрезерование и ворошение. При уборке фрезерной крошки по описанному в статье методу эксплуатационная производительность машин выше за счет снижения уборочной влажности.

5. Получены цикловые сборы при сушке фрезерного торфа по существующей и по предлагаемой технологиям при разных высотах общего и убираемого слоев торфяной крошки. Установлено, что цикловой сбор при сушке торфа в толстых слоях при конечной влажности 33,9 % сохраняется на уровне действующих норм технологического проектирования.

Таким образом, разработанный метод позволяет управлять качественными параметрами торфяного сырья. Это способствует снижению энергоемкости искусственной досушки торфяной крошки в заводских условиях, благодаря чему сокращается время температурного воздействия, а также сохраняется исходный групповой химический состав торфяного сырья для дальнейшей химической переработки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 13672-76 Торф фрезерный для производства брикетов. Технические требования. М.: Издательство стандартов, 1976. 6 с.
2. ГОСТ 11306-2013 Торф и продукты его переработки. Методы определения зольности. М.: Стандартформ, 2014. 8 с.
3. ГОСТ Р 50902-2011. Торф топливный для пылевидного сжигания. М.: Стандартинформ, 2019. 7 с.
4. Панов В.В., Мисников О.С., Купорова А.В. Проблемы и перспективы развития торфяного производства в Российской Федерации // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техн. журнал)*. 2017. № 5. С. 105–117.
5. Наумович В.М. Искусственная сушка торфа. М.: Недра, 1984. 222 с.
6. Misnikov O. A Study of the Properties of Portland Cement Modified Using Peat Based Hydrophobic Admixtures // *Polymer Science. Series D*. 2014. V. 7. № 3. P. 252–259.
7. Misnikov O. Analysis of the Effect of the Composite Peat-based Hydrophobically Modifying Additives on the Properties of Portland Cement and Cement Mortar // *Mires and peat*. 2021. V. 27. № 10. P. 11.
8. Гамаюнов Н.И., Афанасьев А.Е. Исследования процессов сушки фрезерного торфа в тонких слоях на толстой аэрированной подложке // *Торфяная промышленность*. 1977. № 6. С. 25–28.
9. Малков Л.М., Чураева А.И. Исследование процесса сушки фрезерного торфа в тонких слоях // *Сборник научных трудов ВНИИТП*. 1963. Вып. 21. С. 96–182.
10. Kremcheev E.A., Kremcheeva D.A. Validation of Processing Methods for Peat Raw Dehumidification with Excavating Digging // *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2016. V. 7. № 3. P. 1284–1289.
11. Пухова О.В. Оценка влияния технологических параметров на полевою сушку торфяного слоя при его добыче // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 3 (19). С. 53–61.

12. Смирнов В.И., Черткова Е.Ю. Экспертная оценка интенсификации процессов сушки в геотехнологии торфяного производства // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011. № 9. С. 106–113.

13. Черткова Е.Ю. Технология добычи и кондиционирования фрезерного торфа для получения гидрофобных модификаторов. Дисс... канд. техн. наук. Тверь. 2014. 170 с.

14. Мисников О.С., Пухова О.В., Черткова Е.Ю. Физико-химические основы торфяного производства: учеб. пособие. Тверь: ТвГТУ, 2015. 168 с.

15. Пухова О.В. Применение вертикального дренажа для подготовки производственной площадки торфяного участка // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 1 (21). С. 60–68.

16. 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.

17. Столбикова Г.Е., Мисников О.С., Иванов В.А. Процессы открытых горных работ. Фрезерный торф: учеб. пособие. Тверь: ТвГТУ, 2017. 160 с.

**Для цитирования:** Черткова Е.Ю. Оценка технологического метода управления качественными параметрами торфяного сырья // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 2 (22). С. 72–80.

## EVALUATION OF THE TECHNOLOGICAL MANAGEMENT METHOD QUALITATIVE PARAMETERS OF PEAT RAW MATERIALS

E.Yu. CHERTKOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University,  
22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver, e-mail: lastochka-w@mail.ru

The issues of quality management of peat raw materials are considered. A technology has been developed for the extraction of milled peat with the intensification of drying in the field to a harvest moisture content of less than 40 % due to the variable height of the total layer, which makes it possible to control the quality of the extracted raw materials and reduce the energy intensity of the process of its processing. Field tests of this technology have been carried out in a peat deposit. The relative humidity indicators of the harvested peat chips in each cycle were determined using two technologies. The results of a comparative analysis of the operational capacity of machines taking into account different technological parameters of production are presented.

**Keywords:** milling peat, qualitative parameters, intensification, peat drying, milling depth, processing, moisture content, cyclic collections, operational capacity.

Поступила в редакцию/received: 20.02.2024; после рецензирования/revised: 28.02.2024;  
принята/accepted: 01.03.2024



# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 681.518.5

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ТЕРМООБРАБОТКИ КАКАО-БОБОВ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА С ПРОГНОЗИРУЮЩИМИ МОДЕЛЯМИ

К.Б. ФАМ<sup>1</sup>, аспирант, П.М. МУРАШЕВ<sup>1</sup>, аспирант,  
В.Н. БОГАТИКОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, С.М. КИЕУ<sup>2</sup>, магистр

<sup>1</sup>Тверской государственной технической университет,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: phambang79520897405@gmail.com

<sup>2</sup>Военная академия воздушно-космической обороны  
им. Маршала Советского Союза Г.К. Жукова  
170022, Тверь, ул. Жигарева, 50

© Фам К.Б., Мурашев П.М., Богатиков В.Н., Киеу С.М., 2024

В статье описано проектирование и моделирование автоматизированной системы управления (АСУ) на основе алгоритма УПМ-регулятора для управления термической обработкой какао-бобов в ленточной конвейерной сушилке. Процессы термической обработки моделируются как непрерывная, пространственно распределенная система с одним входом и одним выходом, где регулируемой переменной является температура входящего сушильного воздуха, а контролируемой переменной – температура продукта в сушильной камере. Представлены и обсуждены требования к программному и аппаратному обеспечению АСУ. Численное моделирование АСУ проводилось с использованием пакета прикладных программ Matlab. Приведены результаты численного моделирования, подтверждающие, что УПМ-регулятор стабилен и устойчив по отношению к входным помехам. Показано, что система обеспечивает быструю реакцию на смещение и устранение установившейся ошибки в процессе термической обработки.

*Ключевые слова:* УПМ-регулятор, термическая обработка, какао, автоматизированный контроль, стратегия контроля, математическое моделирование.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-2-81-88**

### ВВЕДЕНИЕ

Являясь важнейшим сырьем для производства шоколада и многих других продуктов на его основе, какао-бобы проходят различные технологические процессы, прежде чем попасть к конечному потребителю. Термические подпроцессы представляют собой значительную часть переработки какао, при которой какао-бобы, пасту или смесь в течение определенного времени подвергают воздействию повышенной температуры, чтобы сделать их пригодными для обработки, потребления. Основная цель термической обработки – продлить срок хранения за счет снижения

количества бактерий до приемлемого уровня, а также придать продукту желаемый аромат и вкус. [1] Среди наиболее известных термических подпроцессов при переработке какао – сушка бобов, их обжарка и сушка растворимого какао-порошка. На конечное качество какао-бобов существенное влияние оказывают условия термообработки [2].

Учитывая высокую энергозатратность процессов термической обработки, таких как обжиг и сушка, и растущую стоимость энергии, важно постоянно совершенствовать процессы с целью снижения потребности в энергии (сокращения эксплуатационных затрат) при сохранении или улучшении качественных показателей конечной продукции [3]. Этого можно достичь за счет эффективной автоматизации и контроля термообработки.

Сложность автоматизированного управления термической обработкой пищевой и сельскохозяйственной продукции обусловлена длительными временными задержками в технологическом процессе и преобладанием нелинейности и неопределенностей параметров [4].

В данной статье предложена АСУ термической обработкой какао-бобов на основе алгоритма управления с прогнозирующими моделями (УПМ-регулятора).

### **СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

К основным задачам управления системами термической обработки относятся: поддержание заданной температуры продукта при нарушениях технологического процесса;

максимизация производительности выпуска продукции при сохранении оптимальных эксплуатационных затрат;

предотвращение пересушивания во избежание термического повреждения и роста затрат на электроэнергию, а также недостаточной сушки, приводящей к появлению плесени [5].

К основным параметрам процесса термообработки какао-бобов относятся удельные энергозатраты (на единицу массы испаряемой влаги) и длительность процесса. При конвективной сушке эти параметры определяют качество конечного продукта.

Интенсификация процесса достигается за счет повышения температуры в сушильной камере, которая зависит от температуры входного сушильного воздуха. В результате задача управления терморегулирования сводится к быстрому нагреванию бобов до необходимой температуры и ее поддержанию на протяжении всего процесса.

Существуют разнообразные подходы и методы управления процессами термической обработки сыпучих материалов на различном оборудовании [6]. В рассматриваемой системе процесс можно ускорить, регулируя температуру нагревателя в начале нагрева, чтобы обеспечить прогревание слоя какао-бобов до максимально допустимой температуры ( $T_{max}$ ). После того как слой нагревается до заданной температуры ( $T_{set}$ ), нагреватель перенастраивается для ее поддержания. В этом случае установку можно смоделировать как систему с одним входом и одним выходом, где управляющей переменной является температура входящего сушильного воздуха ( $T_c$ ), а регулируемой переменной – температура продукта ( $T$ ) в сушильной камере.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Термическая обработка пищевых продуктов и других биологических материалов, таких как какао-бобы, происходит в сушильной камере (рис. 1), где слой бобов подвергается воздействию потока горячего воздуха. При конвективной термообработке в камере одновременно реализуются два транспортных механизма:

1. Передача тепловой энергии от горячего воздуха к поверхности зерен посредством конвекции и последующая передача энергии внутрь зерен посредством проводимости.

2. Перенос влаги изнутри слоя на его поверхность путем диффузии и последующий перенос влаги из поверхностного слоя в воздух путем испарения.

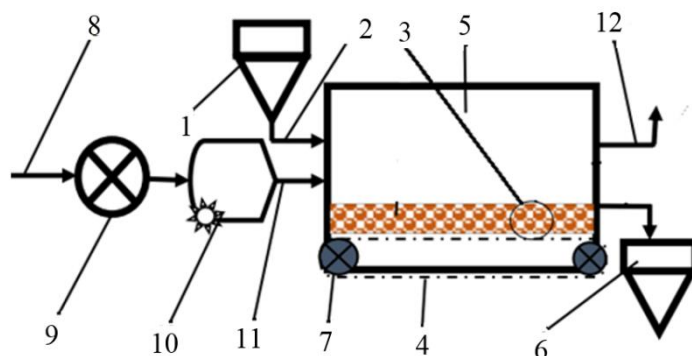


Рис. 1. Технологическая схема сушилки какао-бобов: 1 – вход; 2 – входной поток; 3 – слой какао-бобов; 4 – конвейерная лента; 5 – сушильная камера; 6 – выходной поток; 7 – мотор конвейера; 8 – сушильный воздух на впуске; 9 – вентилятор; 10 – нагреватель; 11 – поток горячего воздуха; 12 – выходной поток воздуха

Уравнение теплопроводности для периода нагрева слоя какао-бобов записывается следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a_p \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}, \\ \left( \begin{array}{l} \tau > 0, \\ -\ell < x < \ell \end{array} \right), \end{cases} \quad (1)$$

где  $T(x, \tau)$  – температурное поле слоя, °С;  $a_p$  – коэффициент температуропроводности слоя какао-бобов, м<sup>2</sup>/с;  $\ell$  – толщина слоя, м.

Начальное условие:

$$\begin{cases} \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0, \\ T(x, 0) = T_0 = const, \\ -\lambda_p \frac{\partial T(\ell, \tau)}{\partial x} + [T_c - T(\ell, \tau)] = 0, \end{cases} \quad (2)$$

Уравнение теплопроводности для периода постоянной скорости термообработки слоя какао-бобов принимает вид

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a_p \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{q_v}{c_p \rho_p}. \quad (3)$$

Начальное условие:

$$\begin{cases} \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial T(\ell, \tau)}{\partial x} + \frac{\alpha}{\lambda_p} (T_c - T(\ell, \tau)) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Передаточная функция процесса термообработки какао-бобов получается путем линеаризации уравнений (1)–(4). Для линеаризации использовали метод рядов Тейлора и преобразования Лапласа [1]. Уравнение (3) упрощается с помощью метода матрицы пропускания [7, 8], а затем параметры теплового процесса (как показано в таблице) подставляются в окончательное уравнение.

Параметры процесса термической обработки какао-бобов

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
Теплота реакции	$q_s$	2 402	Дж/кг
Энергия активации	$U$	22,48	кДж/моль
Универсальная газовая постоянная	$R$	8 310	Дж/кмоль · К
Температура окружающей среды	$T_o$	293	К
Температуропроводность	$a_p$	$3,79 \cdot 10^{-5}$	м <sup>2</sup> /с
Коэффициент теплопередачи	$a$	10	Вт/м <sup>2</sup> · К
Теплопроводность	$X_p$	0,4	Вт/м · К
Удельная теплоемкость	$c_p$	$3,79 \cdot 10^2$	Дж/кг · К
Плотность	$P_p$	2 815	кг/м <sup>3</sup>

Полученная передаточная функция имеет вид [9]:

$$G_p(s) = \frac{s + 0,397}{0,25s + 0,003 12}$$

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Алгоритм MPC (Model Predictive Control) реализуется следующими шагами (рис. 2):

+ Шаг 1: Будущие выходные сигналы находятся в пределах определенного диапазона  $N$ , называемого диапазоном прогнозирования, в каждый момент времени  $t$  с использованием модели процесса. Прогноз выходных значений:  $\hat{y}(k + t|t)$ ,  $k = 1 \dots N$  зависит от значений предыдущих входных и выходных сигналов. Будущий управляющий сигнал  $u(t + k|t)$ ,  $k = 1 \dots N - 1$ :

$$\hat{y}_{k+i} = d_i(u_k, u_{k+1}, \dots, u_{k+i}), \quad (5)$$

+ Шаг 2: Будущие сигналы управления рассчитываются путем оптимизации критерия, который делает систему похожей на закрытую систему с заданной целевой функцией (6). Этот критерий обычно представляет собой квадратичную функцию ошибки между выходными данными прогноза и заданным значением. Эффективность процесса управления зависит от целевой функции.

$$J(u) = \|Y - R\|_Q^2 + \|\Delta U\|_S^2, \quad (6)$$

где  $Q, S$  – веса регуляризации;  $Y$  – вектор выходных значений модели,  $Y = [\hat{y}_{k+1}, \hat{y}_{k+2}, \dots, \hat{y}_{k+N}]$ ;  $R$  – вектор заданных значений показателей качества,  $R = [r_{k+1}, r_{k+2}, \dots, r_{k+N}]$ ;  $\Delta U = [\Delta u_{k+1}, \Delta u_{k+2}, \dots, \Delta u_{k+N}]$  – вектор управляющих воздействий;  $\Delta u_{k+i} = u_{k+i} - u_{k+i-1}$ .

Учитывая, что

$$\begin{aligned} \|Y - R\|_Q^2 &= \|Y - R\|_Q \|Y - R\|^T \\ \|\Delta U\|_S^2 &= \|\Delta U\|_S \|\Delta U\|^T, \end{aligned}$$

формулу (6) можно записать в виде

$$J(u) = \frac{1}{2} \|Y - R\|_Q \|Y - R\|^T + \frac{1}{2} \|\Delta U\|_S \|\Delta U\|^T.$$

Задача оптимизации целевой функции выполняется с помощью заранее выбранных алгоритмов. Наиболее часто применяемыми алгоритмами для задач оптимизации являются методы внутренней точки, активного набора [10], лагранжиана [11], проекции градиента:

$$\begin{aligned} u &= \arg \min (J(u)); \\ J(u) &= \|Y - R\|_Q \|Y - R\|^T + \|\Delta U\|_S \|\Delta U\|^T \rightarrow \min. \end{aligned}$$

+ Шаг 3: Полученный сигнал управления  $u(t|t)$  применяется в процессе, тогда как сигнал управления  $u(t + 1|t)$  также рассчитывается, но не используется, поскольку во время выборки  $y(t + 1)$  определяется и рассчитывается так же, как и в шаге 1, с новыми значениями. Таким образом, полученное значение  $u(t + 1|t + 1)$  отличается от  $u(t + 1|t)$ , поскольку модель обновляет информацию об объекте.

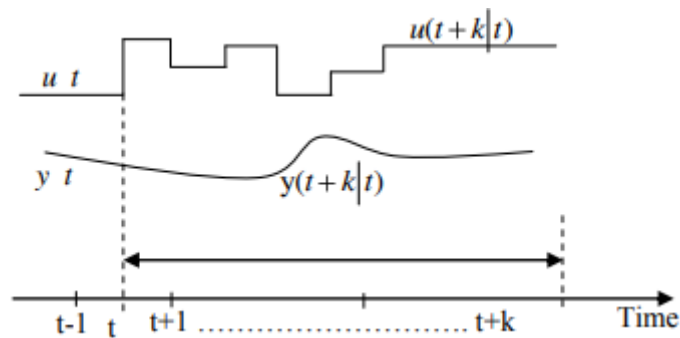


Рис. 2. Алгоритм системы управления с прогнозирующими моделями

Модель прогнозирует выходные данные объекта на основе текущих значений, прошлых значений и будущих сигналов. Сигнал управления определяется оптимизатором.

Прогнозирующий контроллер включает в себя следующие основные компоненты:

- модель системы;
- целевую функцию;
- метод решения оптимизационных задач.

На рис. 3 показана модель системы управления с прогнозирующими моделями.

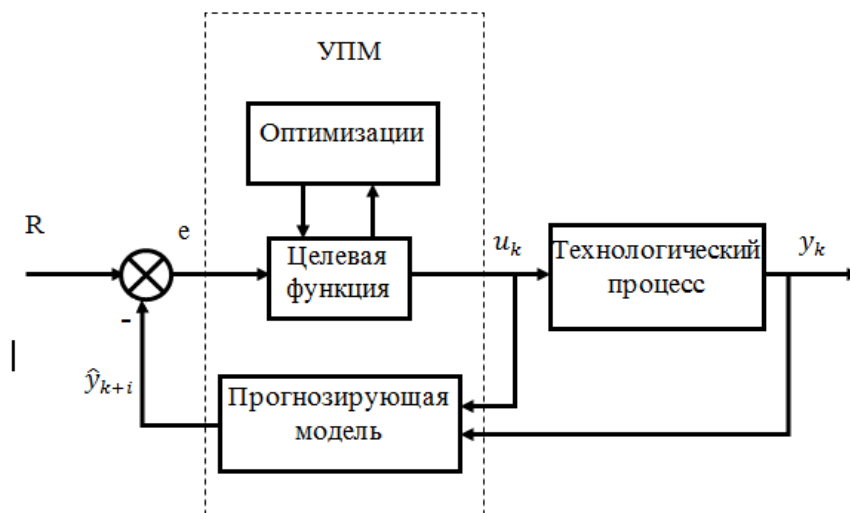


Рис. 3. Модель системы управления с прогнозирующими моделями (УПМ):

- $y_k$  – выходной сигнал реальной системы;
- $u_k$  – сигнал управления объектом в момент времени  $k$

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Математическая модель описанной выше пилотной сушилки с заданными стратегиями управления была реализована в среде Matlab с использованием набора инструментов Simulink. Применялась система с прогнозирующими моделями управления температурой подаваемого осушающего воздуха (рис. 4).

Моделирование проводилось в системе с обратной связью для отслеживания заданной температуры выходных зерен. Данная система управления обеспечивает стабильность требуемых параметров.

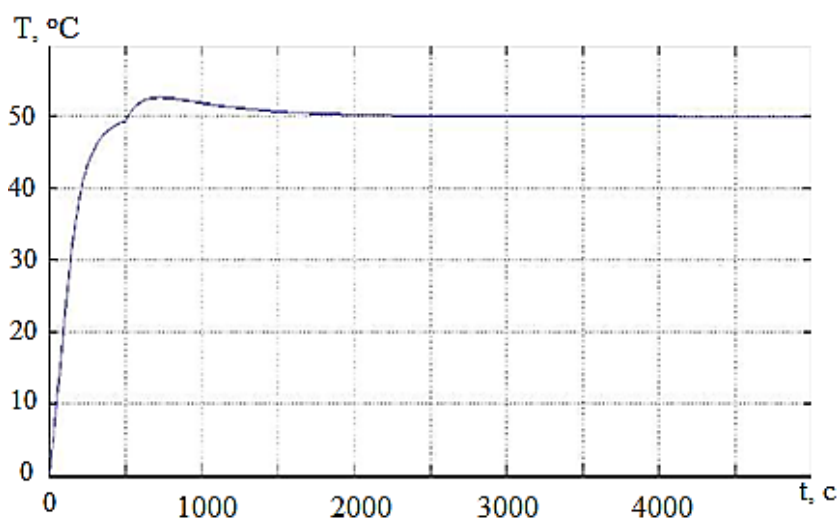


Рис. 4. График реакции контроллера в среде Matlab с использованием набора инструментов Simulink

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процессы термической обработки моделируются как непрерывная пространственно распределенная система с одним входом и одним выходом, где регулирующей переменной является температура сушильного воздуха, а регулируемой – температура продукта в сушильной камере. Были применены алгоритмы системы управления с прогнозирующими моделями в процессе сушки какао-бобов. В целом результаты численного моделирования показывают, что УПМ-регулятор стабилен при управлении процессом сушки какао-бобов.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-07-00914.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Чохонелидзе А.Н., Лемпого Ф., Браун-Аквей В. Математическая модель для процесса термообработки какао-бобов // *Вестник евразийской науки*. 2014. № 6 (25). С. 126.
2. Медведев П.В., Федотов В.А. Технология производства продуктов питания из растительного сырья: учебное пособие. Оренбург: ОГУ, 2021. 96 с.
3. Ефимов А.В., Чернов В.П. Термовременная обработка отливок из стали марки 150ХНМ // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета имени Г.И. Носова*. 2017. № 15 (1). С. 79–85.
4. Areed F.F.G., El-Kasassy M.S., Mahmoud K.A. Design of Neuro-fuzzy Controller for a Rotary Dryer // *International Journal of Computer Applications*. 2012. V. 37. № 5. P. 34–41.
5. Шишацкий Ю.И., Агафонов Г.В., Никель С.А., Семенихин О.А. Повышение эффективности процесса тепловой обработки какао-бобов и арахиса. М.: Пищепромиздат, 2007. 133 с.
6. Дадиомов Р.Ю., Шумихин А.Г., Корнилицин Д.К. Существующие подходы к автоматизации процесса сушки материалов в режиме кипящего слоя // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 5 (89). С. 118–129.

7. Vajta M. Nyquist Stability Test for a Parabolic Partial Differential Equation // *IASTED Conf. on Modeling, Identification and Control*. Innsbruck, Austria. 2000. P. 296–299.
8. Pedro J.O., Dangor M., Dahunsi O.A., Montaz Ali M. Differential Evolution-Based PID Control of Nonlinear Full-Car Electrohydraulic Suspensions // *Mathematical Problems in Engineering*. 2013.
9. Лемпого Ф. Моделирование и управление технологическим процессом термообработки какао-бобов. Дисс... канд. техн. наук. Тверь, 2015. 174 с.
10. Civicioglu P. Backtracking Search Optimization Algorithm for Numerical Optimization Problems // *Applied Mathematics and Computation*. 2013. V. 219. № 15. P. 8121–8144.
11. Стороженко Н.Р., Голева А.И., Шафеева О.П. Моделирование информационных процессов в сети с использованием методов линейного и нелинейного программирования // *Россия молодая: передовые технологии – в промышленность!* 2017. № 2. С. 27–30.

**Для цитирования:** Фам К.Б., Мурашев П.М., Богатиков В.Н., Киеу С.М. Автоматизированное управление процессом термообработки какао-бобов с помощью алгоритма с прогнозирующими моделями // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 2 (22). С. 81–88.

## AUTOMATED CONTROL OF HEAT TREATMENT PROCESS OF COCOA BEANS USING AN ALGORITHM WITH PREDICTIVE MODELS

К.В. FAM<sup>1</sup>, postgraduate, P.M. MURASHEV<sup>1</sup>, postgraduate,  
V.N. BOGATIKOV<sup>1</sup>, Dr. Sc, S.M. KIEU<sup>2</sup>, magister

<sup>1</sup>Tver State Technical University,  
22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver, e-mail: phambang79520897405@gmail.com

<sup>2</sup>Military Academy of Aerospace Defense  
named after Marshal of the Soviet Union G.K. Zhukov  
50, Zhigareva st., 170022, Tver

The article describes the design and modeling of an automated control system (ACS) based on the UPM controller algorithm for controlling the heat treatment of cocoa beans in a belt conveyor dryer. Heat treatment processes are modeled as a continuous, spatially distributed system with one input and one output, where the controlled variable is the temperature of the incoming drying air, and the controlled variable is the temperature of the product in the drying chamber. The requirements for the software and hardware of the automated control system are presented and discussed. The numerical simulation of the automated control system was carried out using the Matlab application software package. The results of numerical simulation are presented, confirming that the UPM controller is stable and stable with respect to input interference. It is shown that the system provides a rapid response to displacement and elimination of the steady-state error during heat treatment.

*Keywords:* MPC regulator, heat treatment, cocoa, automated control, control strategy, mathematical model.

Поступила в редакцию/received: 22.01.2024; после рецензирования/ revised: 6.02.2024;  
принята/accepted: 15.02.2024



## **ВЗАИМОСВЯЗЬ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ**

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

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

© Бурдо Г.Б., Болотов А.Н., 2024

Предложен новый подход к организации взаимодействия автоматизированных систем машиностроительных предприятий. Показано, что эффективное внедрение и использование автоматизированных систем возможно лишь на основе исследования и оптимизации процессов деятельности машиностроительного предприятия путем анализа и оценки качества выполнения функций участниками различных процессов деятельности предприятия. Методология базируется на выявлении главного функционального процесса, в рамках которого выполняются подготовка производства и выпуск готовой продукции и определяются временной параметр и вспомогательные процессы. Сформулированы принципы, необходимые для создания комплекса автоматизированных машиностроительных систем. Проанализированы роль и место каждой из наиболее важных функциональных автоматизированных систем. Приведены соображения относительно последовательности реализации проекта по цифровизации машиностроительного производства.

*Ключевые слова:* машиностроительное производство, автоматизированные системы проектирования и управления, управление процессами, производственный процесс, управление жизненным циклом.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-2-89-99**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Одной из наиболее важных задач в машиностроении, является его цифровизация. К настоящему времени в машиностроительной отрасли используется множество автоматизированных систем различного функционального назначения:

- системы автоматизированного проектирования (САПР ТП, САМ);
- автоматизированные системы конструкторской подготовки производства (CAD, CAE);
- автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП, Scada);
- автоматизированные системы управления ресурсами (ERP-системы);
- система управления взаимоотношениями с клиентами (CRM);
- автоматизированные системы поддержки жизненного цикла изделия;
- автоматизированные системы управления бизнес-процессами и ряд других [1–16].

Как правило, внедрение готовых решений по данным системам вызывает ряд трудностей, связанных с необходимостью изменять алгоритмы действий участников процессов, а также дублировать цепочки передачи информации (передача информации в системы в соответствии с существующими производственными процессами), так как

большинство систем работают автономно в пределах производственных подразделений.

Основная причина указанных проблем, определяющих неэффективное (а иногда и просто формальное) использование автоматизированных систем, заключается в том, что инициаторами и заказчиками разработки указанных систем чаще всего являются IT-специалисты, не всегда вполне четко представляющие структуру процессов деятельности машиностроительного предприятия. Еще одной причиной низкой эффективности использования автоматизированных систем является желание переносить (тиражировать) их в абсолютно другие организационно-технологические системы, далекие от машиностроительных.

Исходя из вышесказанного, целью авторов было выявление методологических закономерностей, используемых при разработке и увязке комплекса автоматизированных систем на машиностроительных предприятиях, а также помощь руководителям предприятий в выборе средств автоматизации и интеллектуализации инженерного труда.

## **1. СТРАТЕГИЧЕСКАЯ ЦЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

К сожалению, в научных публикациях, посвященных определению цели функционирования как машиностроительных, так и других типов предприятий, авторами (подавляющее большинство которых составляют представители экономической школы) постоянно подпитывается идея о том, что главной целью функционирования предприятия является максимальное извлечение прибыли.

Отсюда непонимание смысла деятельности машиностроительной фирмы и не вполне обоснованное придание главенствующей роли экономическим процессам на предприятии, и мысль о динамичном перетекании капиталов в более прибыльные отрасли. Хотелось бы увидеть, каким образом при теперешней жесточайшей конкуренции, диктате на рынке потребителя продукции и сильном государственном управлении можно свободно войти в ту, либо иную прибыльную область промышленности, энергетики, нефти и – газодобыче и т.д. Поэтому каждый предприниматель, каждое предприятие жестко отстаивает занимаемые ими сегменты рынка.

Отсюда и глобальная цель функционирования любого предприятия, в том числе и машиностроительного, обозначаемая как выпуск продукции в соответствии с параметрами качества (последние определяются ее потребителем) в заданные сроки и в заданном количестве. Вопросы экономики – производные от основной цели, и от способа и уровня управления производственным процессом.

## **2. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ПРОЦЕСС В МАШИНОСТРОЕНИИ**

Вернемся к машиностроительным производственным системам, как объекту нашего исследования. Предприятие работает, выпускает продукцию, нередко с использованием автоматизированных систем, так почему же возникает некое их неприятие (не берем системы учета)? Ответ, как это ни парадоксально, очень прост: причина в забвении таких фундаментальных понятий машиностроения, как «производственный процесс» и «технологический процесс». Рассмотрим эти понятия.

Производственный процесс представляет собой совокупность *всех* действий людей и орудий производства, необходимых на данном предприятии для изготовления и ремонта выпускаемых изделий [17–19].

Таким образом, можно отметить два важнейших для определения структуры комплекса автоматизированных систем момента.

1. Производственный процесс включает действия (процессы) по изготовлению, сборке и ремонту изделий; по контролю качества продукции; по хранению и перемещению продукции на всех стадиях производства; по материально-техническому обеспечению; по организации рабочих мест; по управлению всеми техническими службами и производством; по технической подготовке производства; действия, связанные с финансовым обеспечением выпуска продукции; действия по сбыту продукции и другие, т.е. именно совокупность *всех* действий.

2. Словами определения «*на данном предприятии*» подчеркивают, что структура производственного процесса на конкретном предприятии, несмотря на кажущееся сходство с другими предприятиями, всегда имеет существенные особенности, обусловленные типом и серийностью продукции, способом распределения функций между подразделениями, традициями предприятия, квалификацией кадров и рядом других причин.

Какие же принципы создания автоматизированных систем необходимо уяснить, анализируя вышесказанное?

1. Автоматизированные системы должны интеллектуализировать труд работников и повышать его производительность, а не становиться «довеском» к существующим методам работы.

2. Автоматизированные системы должны использоваться для выполнения определенных функций участниками производственного процесса.

3. Реализация автоматизированных систем должна начинаться с исследования и оптимизации структуры производственного процесса и функций его участников.

4. Структура производственного процесса на каждом предприятии имеет свои особенности, что не всегда допускает простое тиражирование автоматизированных систем.

Ранее было определено, что производственный процесс включает в себя ряд процессов. Возникает вопрос: какой из них является главенствующим?

Вспомним основную цель функционирования машиностроительного предприятия: выпуск продукции в соответствии с параметрами качества, определяемыми ее потребителем, в заданные сроки и в заданном количестве. Очевидно, что главенствующими процессами на машиностроительном должны быть процессы по созданию (выпуску) продукции, а именно технологические процессы изготовления изделий и процессы по технической подготовке машиностроительного производства.

### **3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ПРОЦЕССЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА**

Рассмотрим эти понятия с точки зрения реализации автоматизированных систем.

Технологические процессы – части производственного процесса, во время которых происходит изменение и определение качественного состояния (формы, размеров, химических и физико-механических свойств материала, качества поверхностей, внешнего вида, контроль качества и т.п.) объекта производства, а также действия, сопровождающие это изменение [17–19]. Это технологические процессы заготовительного производства, механической обработки, сборки, контроля и испытаний продукции, термической обработки, окраски.

Однако технологические процессы являются завершающей стадией процесса изготовления изделия, а предваряет создание изделия техническая подготовка производства, включающая в себя:

1) процессы конструкторской подготовки производства, т.е. всю стадийность процессов проектирования и конструирования изделия с выпуском полного комплекта конструкторской документации, и процессы управления конструкторской подготовкой производства; грамотное проведение конструкторской подготовки производства обеспечивает получение конструкции изделия заданного техническим заданием технического уровня;

2) процессы технологической подготовки производства: разработку технологических процессов изготовления изделия, проектирование и изготовление средств технологического оснащения (СТО), оформление заявок на приобретение СТО, а также управление процессами технологической подготовки; грамотное выполнение технологической подготовки производства обеспечивает готовность предприятий к реализации технологических процессов, обеспечивающих выпуск продукции заданного качества в заданные сроки и в заданных объемах;

3) процессы организационной подготовки производства, т.е. действия по организации технологических процессов, по всем видам планирования и управления технологическими процессами.

Необходимо отметить, что указанные группы процессов осуществляются параллельно-последовательно с целью сокращения длительности общего цикла технической подготовки производства.

Таким образом, основными процессами по изготовлению продукции на машиностроительном предприятии являются процессы технической подготовки производства и технологические процессы по выпуску продукции. Эти два вида основных процессов следует рассматривать как единый процесс по выпуску продукции и управлять им как единым целым.

Исходя из этого, можно сформулировать следующие принципы создания автоматизированных систем:

поскольку основными процессами по изготовлению продукции на машиностроительном предприятии являются процессы технической подготовки производства и технологические процессы по выпуску продукции, автоматизированные системы должны в первую очередь облегчать реализацию этих процессов;

в рамках управления процессами нельзя отрывать указанные процессы один от другого, так как они направлены на одну и ту же цель: выпуск продукции нужного качества в нужных объемах и в заданные сроки, поэтому автоматизированные системы технической подготовки производства САПР ТП, САПР К, автоматизированного управления технологическими процессами (АСУТП) и управления качеством продукции должны быть информационно интегрированы и иметь прямые и обратные связи.

Могут спросить: а в чем заключается экономический аспект всего этого? Сделаем некоторые уточнения, разъяснив роль и суть экономических подходов.

Нужно понимать, что техническая подготовка производства ведется, как правило, в нескольких вариантах, обеспечивающих техническую сторону производства (выпуск продукции заданного качества, в заданные сроки и в заданных объемах). Вот здесь и понадобятся сравнительные экономические прикидки по себестоимости изделия. Экономика как аппарат оперирует с сопоставимыми техническими решениями, техническими объектами. Кроме того, необходимо хорошо себе представлять, как, оперируя параметрами конструкции изделия и технологического процесса, можно влиять на себестоимость изделия. То же относится и к определению объема финансирования.

Макроэкономические соображения оставим в стороне как весьма сомнительные с точки зрения применимости их в конкретной производственной деятельности.

Тогда сформулируем еще один принцип: техническая сторона производства первична, а экономические вопросы производны от нее, и никак не наоборот; следовательно, автоматизированные системы, связанные с экономической стороной деятельности предприятия, иерархически подчинены АСУТП, САПР ТП, САПР К.

#### **4. ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ**

В последнее десятилетия весьма активно обсуждаются процессы управления качеством продукции и, следовательно, место автоматизированных систем управления качеством [20, 21].

В соответствующей литературе можно встретить спорное, на наш взгляд, утверждение о том, что управление качеством – это способ управления деятельностью машиностроительного предприятия. Отсюда недалеко до тезиса, что система управления качеством представляет собой некое самостоятельное образование.

Попробуем разобраться во всем этом.

Выясним, о каком уровне качества идет речь? Очевидно, о том, которое диктуется потребителем и которое мы хотим получить на выходе.

Где формируется качество? Очевидно, на процессах по изготовлению продукции на машиностроительном предприятии, а именно на процессах технической подготовки производства и на технологических процессах по выпуску продукции. Понятно, что в процессе производства мы используем покупные материалы, полуфабрикаты и комплектующие, поэтому на процессы изготовления деталей они должны поступать требуемого качества.

Где и как контролировать качество и управлять им? Представив вышеперечисленные процессы в виде взаимосвязанных завершенных по смыслу частей (этапов) и сравнивая получаемые на этих частях (этапах) общего процесса результаты с требуемыми с точки зрения качества (эти последние являются производными от технического задания на продукцию) мы можем сделать вывод об уровне качества решения (о возможности дальнейшего действия – перехода к следующим частям общего процесса или уточнения решения) [22].

Следовательно, можно сформулировать еще один принцип создания комплекса автоматизированных систем: с учетом того, что процессы управления качеством непосредственно встроены в основные производственные процессы, а уровень качества определяется системой управления организацией для его обеспечения в производстве, автоматизированные системы управления качеством продукции предприятия иерархически подчинены АСУТП, САПР ТП, САПР К.

#### **5. ERP-СИСТЕМЫ ДЛЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Не обойдены вниманием в последнее время и ERP-системы (Enterprise Resource Planning (ERP) – распределение ресурсов предприятия), иногда представляемые как универсальное средство для решения всех вопросов, связанных с деятельностью предприятия [14]. Позволим не согласиться с этим тезисом по следующим соображениям:

1. Указанные системы предназначены в основном для крупных предприятий; для средних, а тем более малых предприятий они оказываются слишком громоздкими.

2. ERP-системы включают набор модулей для управления финансами, трудовыми и материальными ресурсами, поставками, продажами, запасами, документооборотом и т.д. Но зададимся вопросом: с какой целью функционируют системы?

Ответ очевиден: для обеспечения возможности реализации основных производственных процессов, а следовательно, ERP-системы обслуживают их. Все сведения о потребном количестве ресурсов различных видов определяются на основе результатов выполнения работ на этапах технической подготовки производства и планирования управления технологическими процессами.

Отсюда еще один принцип внедрения комплекса автоматизированных систем: ERP-системы для крупных машиностроительных предприятий обслуживают основные производственные процессы машиностроительного производства и получают исходную информацию от САПР К, САПР ТП и подсистем объемного и календарного планирования в составе АСУТП. Для средних и малых предприятий роль ERP-систем играют отдельные программные средства.

## **6. МЕТОДОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ПРОДУКЦИИ**

Методология управления жизненным циклом продукции (или, как ее еще называют, методология управления данными об изделии, что, на наш взгляд, более точно отражает ее суть) представляет достаточный практический интерес для машиностроительных предприятий в двух аспектах:

в разрезе дифференциации процессов деятельности организаций, и это позволяет уточнить, какая часть общего жизненного цикла изделия реализуется на каждом предприятии;

с точки зрения хранения и обмена информацией внутри предприятия и между предприятиями, реализующими весь жизненный цикл изделия, благодаря чему можно структурировать ее потоки.

На основании вышеизложенного сформулируем следующий принцип создания комплекса автоматизированных машиностроительных систем [6]:

автоматизированные системы поддержки жизненного цикла целесообразно использовать как средство информационного обмена в пределах каждого предприятия, а также между предприятиями, в рамках которых реализуется жизненный цикл изделия. В пределах одного предприятия автоматизированные системы поддержки жизненного цикла помогают информационно интегрировать как основные функциональные автоматизированные системы (используемые для автоматизации функций основных производственных процессов) между собой, так и основные функциональные автоматизированные системы со вспомогательными (автоматизируют функции неосновных процессов предприятия).

## **7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ПРЕДПРИЯТИЯ**

В первую очередь уясним, что мы будем понимать под структурой производственного процесса. Как системный объект, структуру производственного процесса можно определить следующим образом:

$$PP = \{F, K, I, S, T\},$$

где  $F$  – основная функция производственного процесса, являющаяся логическим объединением частных функций  $f_j$  каждого процесса,  $F = \bigvee_1^K f_j$ ;  $K$  – число процессов в производственном процессе;  $I$  – иерархия процессов;  $S$  – функциональные связи между процессами (функциональная структура);  $T$  – временные связи между процессами (временная структура).

Следует иметь в виду, что процессы не ограничиваются рамками одного структурного подразделения [23]. Структуру производственного процесса следует строить начиная с основного функционального процесса. Как мы определили выше, основной функциональный процесс (процесс первого уровня иерархии) включает процессы технической подготовки производства (конструкторской, технологической и организационной) и технологические процессы по выпуску продукции.

Этот процесс определяет временной параметр и вспомогательные процессы, сопровождающие основной функциональный. Такими вспомогательными процессами являются процессы финансового обеспечения, материального обеспечения, кадрового обеспечения, и организационного обеспечения. Это процессы второго уровня иерархии, необходимые для реализации основного функционального и логически с ним связанные.

Процессы второго уровня в свою очередь определяют процессы третьего уровня иерархии, функционально связанные с процессами второго уровня и необходимые для их реализации. Например, для реализации технологических процессов необходимо иметь соответствующие материалы и полуфабрикаты (то есть выполнить процессы материально-технического обеспечения, второй уровень иерархии); с этой целью необходимо предусмотреть определенные финансовые резервы, своевременно произвести оплату, т.е. осуществить процессы третьего уровня.

Глубина расчленения процессов определяется возможностью управления ими в рамках конкретной организации. Следует определить также степень детализации процессов на операции в пределах одного уровня. Такое расчленение рекомендуется производить, исходя из возможности оценки промежуточных результатов и из смысловой завершенности операции. Например, если на предприятии функционирует система управления качеством, то степень дифференциации следует выполнять исходя из возможности оценки влияния промежуточного результата на конечный результат процесса.

Для чего необходимо представление всей деятельности предприятия в виде процессов?

Во-первых, это показывает, что любая деятельность на предприятии – это не единовременное действие, а процесс, реализуемый несколькими участниками и имеющий определенную длительность, обусловленную параллельно-последовательным способом выполнением действий.

Во-вторых, с целью выделения функциональных взаимосвязанных процедур, направленных на реализацию законченной функции и проходящих через несколько подразделений организации, т.е., по сути, для формирования функциональной структуры предприятия или организации.

В-третьих, для того чтобы выявить связи, реализуемые между подразделениями организации и необходимые для выполнения производственного процесса.

И, в-четвертых, для определения вида специализированных автоматизированных систем, необходимых для повышения эффективности и уровня интеллектуализации труда.

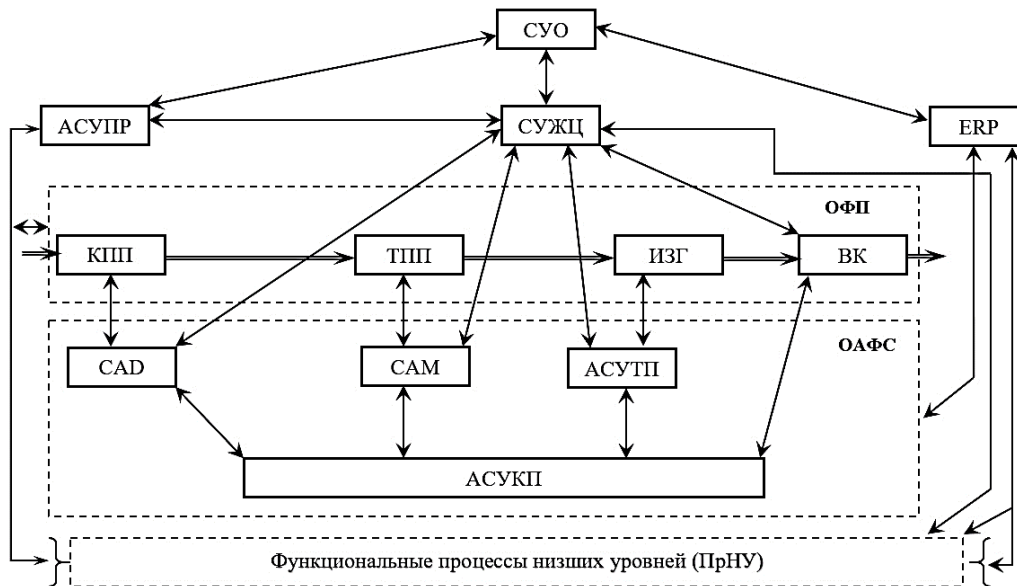
Вне сомнения, все процессы, реализуемые на предприятии, должны подлежать управлению, в том числе и с помощью автоматизированных систем. С этой целью можно предложить следующие принципы их создания:

все без исключения процессы должны быть синхронизированы по времени;  
основной функциональный процесс в обязательном порядке дополнительно должен подлежать управлению по качеству выпускаемой продукции.

Понятно, что, анализируя и выявляя процессы, мы должны стремиться и к их улучшению.

## 8. СОСТАВ И ВЗАИМОСВЯЗЬ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

На взгляд авторов, один из возможных вариантов организации функционирования автоматизированных систем показан на рисунке.



Взаимосвязь автоматизированных систем

Основной функциональный процесс (ОФП) включает следующие основные этапы:

- конструкторскую подготовку производства (КПП);
- технологическую подготовку производства (ТПП);
- изготовление продукции (ИЗГ);
- выходной контроль (ВК).

Система управления организацией (СУО) определяет способы и методы реализации всех видов действий, осуществляемых в организации.

Автоматизированная система управления процессами (АСУПР) имеет прямые и обратные информационные связи с СУО и непосредственно управляет основными и вспомогательными процессами, а также имеет информационные связи с системой управления жизненным циклом изделия (СУЖЦ). Последняя аккумулирует и распределяет информацию между пользователями (СУО; основной функциональный процесс; процессы низших уровней (ПрНУ); основные автоматизированные функциональные системы (ОАФС): САД (конструкторская подготовка производства), САМ (технологическая подготовка производства), АСУТП (управление технологическими процессами), АСУКП (управление качеством продукции); АСУПР, ERP-система). Основные автоматизированные функциональные системы обеспечивают автоматизацию инженерной деятельности в рамках ОФП.

Основные автоматизированные функциональные системы непосредственно встроены в основной функциональный процесс.



ERP-системы обслуживают основные и вспомогательные производственные процессы машиностроительного производства и обмениваются информацией с CAD, CAM и АСУТП через СУЖЦ.

Таким образом, данная схема обеспечивает достаточно простой обмен информацией и отвечает установленным принципам создания автоматизированных систем.

### **ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ**

Анализируя предлагаемый подход, можно увидеть следующие положительные моменты применения автоматизированных систем на машиностроительном предприятии:

1. Использование автоматизированных систем не навязывается какой-то искусственный подход, несвойственный инженерной деятельности в машиностроительных производствах.

2. Автоматизированные системы представляют собой не центры принятия решений, а средства поддержки инженерно-управленческих решений.

3. Применение средств автоматизации и интеллектуализации труда не нарушает логики процессов функционирования машиностроительных предприятий.

4. Создаются предпосылки для исключения дублирования потоков информации и дублирования функций в рамках производственного процесса машиностроительного предприятия.

5. Становятся понятной иерархичность процессов машиностроительного предприятия и более очевидными рычаги управления фирмой.

6. Реализация автоматизированных систем не требует переобучения персонала.

Можно констатировать, что предлагаемый способ взаимодействия автоматизированных систем полностью укладывается в концепцию цифровой экономики, но при этом весьма важным представляется сохранение принятых в машиностроении алгоритмов реализации процессов деятельности. В противном случае у работников возникает непонимание и неприятие способов деятельности и, как результат, отказ от использования таких систем.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Говоря о применении автоматизированных систем, необходимо для каждого конкретного машиностроительного предприятия определить последовательность реализации проекта по его информационной увязке (по реализации идеологии цифровизации) [24].

Считаем, что можно предложить такую последовательность действий:

1. Выявить и структурно выделить основной функциональный процесс в рамках производственного процесса предприятия.

2. Выявить взаимосвязанные с ним процессы следующего уровня.

3. Усовершенствовать временные, функциональные и информационные связи между всеми процессами.

4. Определить способ управления процессами предприятия.

5. Определить, какие функциональные автоматизированные системы необходимы для автоматизации инженерного труда в рамках основного процесса.

6. Определить, какие автоматизированные системы необходимы для автоматизации инженерного труда в рамках процессов низших уровней.

7. Определить систему поддержки жизненного цикла изделия, выполняющую функции хранения и обмена информацией между различными автоматизированными подсистемами.

8. Организовать информационный обмен между автоматизированными системами.

Как следует из вышесказанного, состав информационных систем определяется исходя из потребностей основного функционального процесса. Логика тут простая: мы хотим улучшить то, что уже делаем, а не перестраивать процессы деятельности организации под автоматизированные системы. Такой подход соответствует логике любой человеческой деятельности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аверченков В.И., Казаков В.С., Казаков П.В. Методология интеллектуального проектирования технических систем на основе имитационных моделей // *Техника машиностроения*. 2002. № 3. С. 18–27.

2. Андрейченко А.Н. «Вертикаль» – новое поколение технологических САПР: объектный подход // *САПР и графика*. 2005. № 6. С. 30–35.

3. Башмаков А.И., Башмаков И.А. Интеллектуальные информационные технологии: учебное пособие. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 304 с.

4. Беззуб А.В., Чилингаров К.М. «Старый новый» метод автоматизации проектирования техпроцессов // *САПР и графика*. 2006. № 6. С. 10–16.

5. Боткин Ю.А., Голдовский П.С. Интегрированная САПР и модульное проектирование // *САПР и графика*. 2005. № 6. С. 45–50.

6. Бурдо Г.Б. Принципы построения автоматизированной системы управления технологическими процессами в многономенклатурных производствах // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2010. № 3 (48). С. 113–118.

7. Денисов А.Р., Левин М.Г. Подходы к организации конструкторско-технологической подготовки производства // *Проблемы теории и практики управления*. 2008. № 7. С. 52–61.

8. Соломенцев Ю.М., Митрофанов В.Г., Павлов В.В., Рыбаков Л.В. Информационно-вычислительные системы в машиностроении и CALS-технологии. М.: Наука, 2003. 292 с.

9. Кузьмин Б.В. Универсальные и инструментальные системы компании «СПРУТ-технология» // *САПР и графика*. 2009. № 9. С. 34–39.

10. Кондаков А.И. САПР технологических процессов. М.: Академия, 2007. 272 с.

11. Российский комплекс программ T-FLEX CAD/CAM/CAE/PDM. Топ Системы. URL: <https://www.tflex.ru/?ysclid=ls99nqciwa506235310> (дата обращения: 15.01.2024).

12. Оптимизация конструкторско-технологической подготовки производства на машиностроительном предприятии: каталог решения компании АСКОН. URL: <https://ascon.ru/solutions/tpp/?ysclid=ls9a1n9uv3354160396> (дата обращения: 15.01.2024).

13. Колчин А.Ф., Овсянников М.В., Стрекалов А.Ф., Сумароков С.В. Управление жизненным циклом продукции. М.: Анахарсис, 2002. 304 с.

14. О'Лири Д. ERP-системы. Современное планирование и управление ресурсами предприятия. М.: Вершина, 2004. 271 с.

15. Балахонова И.В., Волчков С.А., Капитуров В.А. Интеграция процессов с помощью ERP-системы. М: Приоритет, 2006. 464 с.

16. Бурдо Г.Б. Интеллектуальные средства проектирования технологических процессов // *Программные продукты и системы*. 2010. № 3 (91). С. 51–54.

17. Технология машиностроения: в 2-х т. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов / под ред. А.М. Дальского. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2001. Т. 1. 459 с.

18. Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. 457 с.
19. Корсаков В.С. Технология машиностроения. М.: Машиностроение, 1977. 317 с.
20. Ваймерских С., Джордж А. Всеобщее управление качеством: стратегии и технология, применяемые сегодня в самых успешных компаниях (TQM) / пер. с англ. СПб.: Виктория плюс, 2002. 435с.
21. Burdo G. Automated Quality Management System in Mechanical Engineering // *International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry*. Cham: Springer International Publishing, 2018. P. 218–224.
22. Бурдо Г.Б., Семенов Н.А., Сорокин А.Ю. Принципы оценки решений в автоматизированной системе управления качеством машиностроительной продукции // *Программные продукты и системы*. 2016. № 2 (114). С. 113–118.
23. Смирнова Н.В. Как не наступить на грабли при переходе на процессное управление // *Управлению производством*. 2009. № 3. С. 26–32.
24. Burdo G. Basic Approaches to Creating Automated Design and Control Systems in a Machine-Building Industry // *International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry*. Cham: Springer International Publishing. 2019. P. 281–288.

**Для цитирования:** Бурдо Г.Б., Болотов А.Н. Взаимосвязь автоматизированных систем управления и проектирования в машиностроительной организационно-технологической системе // *Вестник Тверского государственного технического университета*. Серия «Технические науки». 2024. № 2 (22). С. 89–99.

## THE RELATIONSHIP OF AUTOMATED CONTROL AND DESIGN SYSTEMS IN THE MACHINE-BUILDING ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL SYSTEM

G.B. BURDO, Dr. Sc., A.N. BOLOTOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: gbtms@yandex.ru

A new approach to the organization of interaction of automated systems of machine-building enterprises is proposed. It is shown that the effective implementation of the use of automated systems is possible only on the basis of research and optimization of the processes of a machine-building enterprise, and on the basis of analysis and assessment of the quality of performance of functions by participants in various processes of the enterprise. The methodology is based on the identification of the main functional process within which the preparation of production and the release of finished products are carried out, and the time parameter and auxiliary processes are determined. The basic principles underlying the creation of a complex of automated machine-building systems are formulated. The role and place of each of the main functional automated systems are analyzed. The considerations on the sequence of implementation of the project on digitalization of machine-building production are given.

*Keywords:* machine-building production, automated design and control systems, process management, production process, life cycle management.

Поступила в редакцию/received: 18.01.2024; после рецензирования/revised: 20.01.2024;  
принята/accepted: 05.02.2024

## УПРАВЛЕНИЕ СУШКОЙ СУСПЕНЗИИ ХЛОРЕЛЛЫ С УЧЕТОМ ВЯЗКОСТИ

О.Л. АХРЕМЧИК, д-р техн. наук, Н.В. КУЗНЕЦОВ, асп.

Тверской государственной технической университет  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: axremchic@mail.ru

© Ахремчик О.Л., Кузнецов Н.В., 2024

Представлены результаты, полученные в ходе процедур структурного синтеза систем управления сушкой суспензии микроводоросли. Снижение дисперсии показателей качества порошка хлореллы обеспечивается за счет использования корректирующего воздействия по вязкости суспензии в регуляторе температуры сушильного агента. Вязкость измеряется перед подачей суспензии на распылительное сопло дополнительно введенным в состав системы управления прибором. Рассмотрена структура измерителя вязкости суспензии. В качестве регулятора температуры предлагается применять нечеткий регулятор температуры сушильного агента. Лингвистическая оценка регулируемого и корректирующего воздействий осуществляется по трем термам на основе прямоугольных функций принадлежности.

*Ключевые слова:* управление, вязкость, температура, переменная, нечеткий регулятор, сушка, суспензия, структура.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-2-100-107**

### ВВЕДЕНИЕ

Технологические приемы выращивания одноклеточных водорослей позволяют повсеместно осуществлять производство эмульсий и суспензий для получения биодобавок, комбикормов, дрожжей и пр. Широкое применение в качестве сырья получили суспензии водоросли *Chlorella vulgaris* [1]. Суспензия образуется на выходе биореактора и представляет собой клетки микроводоросли, суспендированные в питательном растворе на основе воды. Температура питательного раствора и суспензии в биореакторе поддерживаются на заданном уровне [2]. Во многих случаях производится также сухой порошок хлореллы. Процесс изготовления порошка включает подготовку посадочного материала, приготовление растворов, культивирование субстрата в биореакторе, фильтрацию и флокуляцию субстрата, сушку суспензии, упаковку и хранение порошка.

Авторы рассматривают процесс сушки суспензии хлореллы в прямоточных распылительных сушилках, когда сушильный агент вступает в контакт с рассеиваемыми через сопло каплями суспензии в верхней части сушильной камеры. Капли имеют максимальную влажность при температуре мокрого термометра, и поток сушильного агента передает большую часть тепла на испарение влаги.

Исследования моделей распылительных сушилок показали, что капли при рассеивании в сушилке имеют разный размер. Капли, меньшие по размеру, концентрируются вблизи оси сушильной камеры, и их температура быстро сравнивается с температурой сушильного агента. Более крупные капли движутся к периферии камеры и сохраняют большее количество влаги за одно и то же время сушки [3]. Это явление приводит к значительному разбросу показателей качества сухого

продукта, в качестве которых рассматриваются влажность порошка хлореллы после сушки и дисперсность высушенных частиц.

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Цель работы состоит в снижении дисперсии показателей качества высушенного продукта. Объект исследования – процесс управления распылительной сушкой суспензии водоросли хлорелла. Предмет исследования – состав системы управления. Методология исследования основана на процедуре структурного синтеза системы управления процессом сушки суспензии.

Основные задачи исследования:

- выделение измеряемых, возмущающих, управляющих переменных;
- определение структуры системы управления с коррекцией по промежуточной переменной;
- разработка структуры измерительного прибора вязкости суспензии;
- выбор типа регулятора температуры сушильного агента в системе управления процессом сушки.

Поиск решения задачи структурного синтеза системы управления сложным объектом, к которому относится процесс сушки суспензии, происходит в ходе итераций процедур анализа, синтеза и рационального выбора. Структура системы управления считается определенной, если выявлены управляющие, наблюдаемые и возмущающие воздействия, определены координирующие и корректирующие сигналы между контурами и подсистемами системы управления [4]. Выделение новой переменной в качестве наблюдаемой может изменять (и изменяет) структуру регулятора и системы управления. Авторами процедура синтеза разбита на стадии выделения целей управления, контуров регулирования, измеряемых и управляющих переменных.

### **ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ В СОСТАВЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПРОЦЕССА СУШКИ**

Распылительная сушка суспензии хлореллы производится после ее фильтрации на выходе биореактора. Сушка осуществляется нагретым воздухом, используемым в качестве сушильного агента.

В состав распылительной сушилки входят (рис. 1):

- 1, 11 – фильтры;
- 2 – нагреватель воздуха;
- 3 – прибор для измерения вязкости суспензии;
- 4 – система управления;
- 5 – насос подачи суспензии;
- 6 – распылительная форсунка;
- 7 – компрессор сжатого воздуха;
- 8 – сушильная камера;
- 9 – циклон;
- 10 – емкость для порошка хлореллы;
- 12 – вентилятор;
- 13 – измерительный преобразователь температуры сушильного агента.

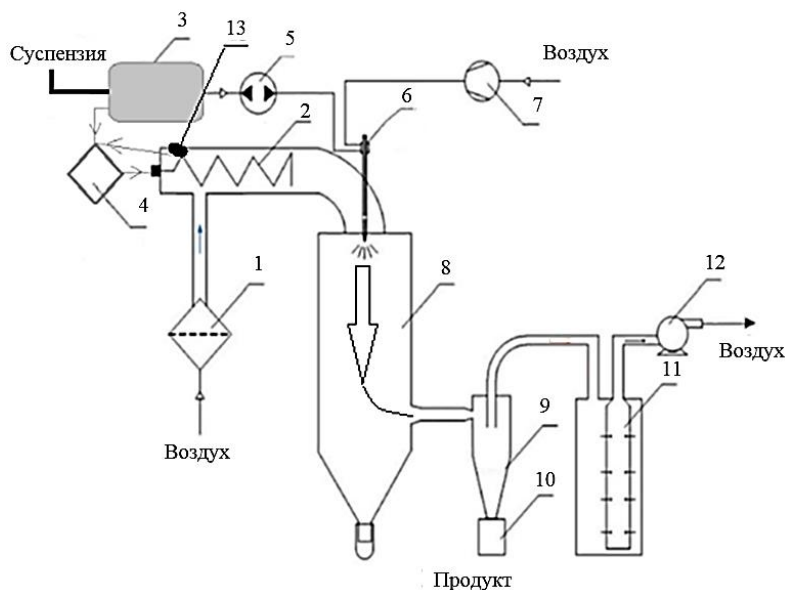


Рис. 1. Схема сушилки для производства порошка хлореллы

При рассмотрении камеры распылительной сушилки как объекта управления ранее были выделены температура сушильного агента и температура суспензии на входе в сушилку как доминирующие факторы, определяющие эффективность сушки [5]. В ходе рассмотрения в качестве целевой функции управления дисперсии показателей качества порошка хлореллы выделена дополнительная переменная – вязкость суспензии водоросли после фильтрации (перед сушкой). Измерение и учет вязкости при сушке позволяют снизить инерционность канала управления «температура сушильного агента → содержание влаги в продукте». Таким образом, новизна авторского подхода заключается в совместном рассмотрении в задаче управления процессом производства сухого продукта стадий фильтрации и сушки на основе дополнительно вводимого наблюдателя вязкости суспензии и учета сигнала с выхода наблюдателя как корректирующего в контуре регулирования температуры сушильного агента.

Система управления поддерживает температуру воздуха на входе сушилки в пределах, установленных на основе экспериментальных исследований процесса сушки суспензии. Если температура окажется недостаточно высокой, то порошок будет иметь избыточную влагу; если же температура будет повышенной, то пересушенный продукт потеряет полезные свойства [6].

Авторами предлагается проводить непрерывный контроль вязкости суспензии, подаваемой на форсунку сушилки. Сущность корректирующего воздействия по переменной «Вязкость» заключается в том, что если значение вязкости суспензии ниже заданного значения (нормы), то нужно выработать дополнительное управление для поддержания температуры сушильного агента (воздуха) на входе в сушилку (и, соответственно, температуры в сушильной камере) для полного испарения избыточной влаги.

Для измерения вязкости суспензии хлореллы в состав системы управления вводится вискозиметр, построенный на основе модифицированного решения, предложенного учеными Тверского государственного технического университета [7].

Прибор контроля вязкости включает (рис. 2):

1, 2 – привод и шестеренчатый насос, обеспечивающие точную подачу суспензии;

3, 4 – измерительный узел (капилляр и диафрагму);

5, 6 – преобразователи перепада давлений в электрический сигнал на составляющих измерительного узла;

7 – измерительный преобразователь температуры;

8 – накопительный резервуар;

9 – измерительный преобразователь уровня суспензии;

10 – насос;

11 – подсистему анализа и сбора измерительной информации;

12 – термостат;

13 – локальный регулятор температуры в термостате.

Насос 10 на рис. 2 и насос 5 на рис. 1 являются одним и тем же агрегатом. После измерения вязкости (см. поз. 3 рис. 1) прибором, построенным по принципу капиллярного вискозиметра (рис. 2), сигнал с выхода анализатора (см. поз. 11 на рис. 2) подается в систему управления температурой сушильного агента (см. поз. 4 на рис. 1).

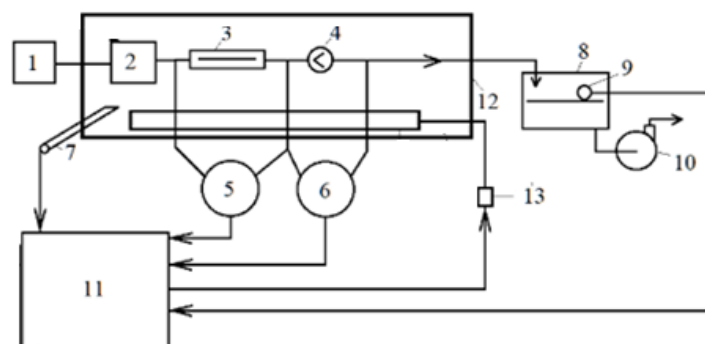


Рис. 2. Структура прибора для измерения вязкости суспензии

## НЕЧЕТКИЙ РЕГУЛЯТОР ТЕМПЕРАТУРЫ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА

В ходе выбора закона регулирования температуры выявлены сложности, связанные с масштабированием технологических схем распылительных сушилок, а также трудности получения передаточных функций по каналам ошибки и возмущений в системе управления температурой сушильного агента. Поэтому в качестве регулятора температуры сушильного агента (воздуха) предлагается использовать нечеткий регулятор (НР), применяемый при недостаточных знаниях для построения моделей объекта, но при наличии опыта управления им [8].

В авторской разработке входными сигналами НР являются сигналы ( $t$ ) с датчика температуры сушильного агента  $T$  в камере нагрева (см. поз. 13 на рис. 1) и вязкости ( $\mu$ ) с подсистемы анализа (см. поз. 11 рис. 2). Выход регулятора ( $u$ ), обеспечивающий расход энергии на нагрев, формируется на основе правил нечеткого вывода (рис. 3).

В НР применяются лингвистические переменные «Вязкость», «Температура», «Управление». На естественном языке закон управления температурой сушильного агента с использованием дополнительного корректирующего воздействия по вязкости можно сформулировать следующим образом: если значение вязкости превысит значение  $\mu_0 + \Delta_\mu$  (больше нормы  $\mu_0$ ), то значение температуры агента нужно снизить до  $t_0 - \Delta_t$ , а если значение вязкости окажется меньше  $\mu_0 - \Delta_\mu$  (меньше нормы  $\mu_0$ ), то значение температуры агента следует повышать до  $t_0 + \Delta_t$ .

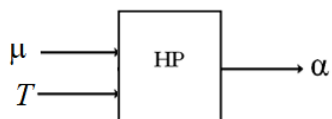


Рис. 3. Структура регулятора температуры

Фаззификация входных сигналов в законе регулирования температуры сушильного агента осуществляется на основе прямоугольных функций принадлежности. Детализация правил закона управления проводится для формулировки с использованием термов. Для лингвистических переменных предлагается использовать по три терма для каждой переменной (табл. 1). Цветовым фоном в таблицах выделяется переход от минимального управляющего воздействия (фиолетово-синеватый фон) к максимальному (красно-коричневый фон).

Таблица 1. Правила формирования управления в законе регулирования температуры

Вязкость \ Температура	Меньше нормы $\mu < \mu_0 - \Delta_\mu$	Норма $\mu_0 - \Delta_\mu \leq \mu < \mu_0 + \Delta_\mu$	Больше нормы $\mu \geq \mu_0 + \Delta_\mu$
Меньше нормы $t < t_0 - \Delta_t$	Значительно увеличиваем «Управление»	Увеличиваем «Управление»	Не меняем «Управление»
Норма $t_0 - \Delta_t \leq t < t_0 + \Delta_t$	Увеличиваем «Управление»	Не меняем «Управление»	Уменьшаем «Управление»
Больше нормы $t \geq t_0 + \Delta_t$	Не меняем «Управление»	Уменьшаем «Управление»	Значительно уменьшаем «Управление»

Функции фаззификации для корректирующего воздействия имеют вид:

значение параметра вязкость «меньше нормы»:

$$\alpha_\mu^1 = \begin{cases} 1, & \text{при } \mu < \mu_0 - \Delta_\mu; \\ 0, & \text{при } \mu \geq \mu_0 - \Delta_\mu; \end{cases}$$

значение параметра вязкость – «норма»:

$$\alpha_\mu^2 = \begin{cases} 0 & \text{при } \mu_0 - \Delta_\mu < \mu \\ 1 & \text{при } \mu_0 - \Delta_\mu \leq \mu < \mu_0 + \Delta_\mu; \\ 0, & \text{при } \mu \geq \mu_0 + \Delta_\mu \end{cases}$$

значение параметра вязкость «больше нормы»:

$$\alpha_\mu^3 = \begin{cases} 0, & \mu < \mu_0 + \Delta_\mu \\ 1, & \mu \geq \mu_0 + \Delta_\mu \end{cases}$$



Функции принадлежности для управляемого параметра имеют вид:

1) значение параметра температура «меньше нормы»:

$$\alpha_t^1 = \begin{cases} 1, & \text{при } t < t_0 - \Delta_t, \\ 0, & \text{при } t \geq t_0 - \Delta_t, \end{cases}$$

2) значение параметра температура – «норма»:

$$\alpha_t^2 = \begin{cases} 0, & \text{при } t_0 - \Delta_t < t \\ 1, & \text{при } t_0 - \Delta_t \leq t < t_0 + \Delta_t, \\ 0, & \text{при } t \geq t_0 + \Delta_t \end{cases}$$

3) значение параметра температура «больше нормы»:

$$\alpha_t^3 = \begin{cases} 0, & t < t_0 + \Delta_t \\ 1, & t \geq t_0 + \Delta_t. \end{cases}$$

Формализацию правил вывода  $R^j (j = 1, \dots, 9)$  для управления  $u$  для шага  $k$  при работе логико-лингвистического регулятора можно представить в виде набора:

$R^1$ : если  $\alpha_\mu^i$  есть  $\alpha_\mu^1$  и  $\alpha_t^i$  есть  $\alpha_t^1$ , то  $u_k = u_{k-1} + 2\Delta$ , иначе  $R^2$ ;

$R^2$ : если  $\alpha_\mu^i$  есть  $\alpha_\mu^1$  и  $\alpha_t^i$  есть  $\alpha_t^2$ , то  $u_k = u_{k-1} + \Delta$ , иначе  $R^3$ ;

$R^3$ : если  $\alpha_\mu^i$  есть  $\alpha_\mu^1$  и  $\alpha_t^i$  есть  $\alpha_t^3$ , то  $u_k = u_{k-1}$ , иначе  $R^4$ ;

...;

$R^9$ : если  $\alpha_\mu^i$  есть  $\alpha_\mu^3$  и  $\alpha_t^i$  есть  $\alpha_t^3$ , то  $u_k = u_{k-1} - 2\Delta$ , иначе  $R^1$ .

Процесс перехода от функций принадлежности к числовым значениям называется дефазсификацией. Авторами сформулирован набор правил дефазсификации для НР температуры сушильного агента (табл. 2). В качестве аргументов правил используются переменные «Температура» (регулируемая) и «Вязкость» (корректирующая).

Таблица 2. Правила расчета выходного воздействия «Управление»

Температура \ Вязкость	Меньше нормы	Норма	Больше нормы
	$\mu < \mu_0 - \Delta_\mu$	$\mu_0 - \Delta_\mu \leq \mu < \mu_0 + \Delta_\mu$	$\mu \geq \mu_0 + \Delta_\mu$
Меньше нормы $t < t_0 - \Delta_t$	$0,5(\alpha_\mu^1 + \alpha_t^1)$	$0,5(\alpha_\mu^2 + \alpha_t^1)$	$0,5(\alpha_\mu^3 + \alpha_t^1)$
Норма $t_0 - \Delta_t \leq t < t_0 + \Delta_t$	$0,5(\alpha_\mu^1 + \alpha_t^2)$	$0,5(\alpha_\mu^2 + \alpha_t^2)$	$0,5(\alpha_\mu^3 + \alpha_t^2)$
Больше нормы $t \geq t_0 + \Delta_t$	$0,5(\alpha_\mu^1 + \alpha_t^3)$	$0,5(\alpha_\mu^2 + \alpha_t^3)$	$0,5(\alpha_\mu^3 + \alpha_t^3)$

Числовой расчет выходных значений НР позволяет перейти от лингвистических термов к количественным значениям управляющего воздействия на изменение расхода энергии (табл. 3). Интерпретация количественного значения при использовании энергии пара означает степень открытия регулирующего клапана, а при использовании электронагревателя – отношения продолжительности включения термонагревающего элемента ко времени работы нагревателя.

Таблица 3. Таблица значений выходного параметра регулятора

Вязкость Температура	Меньше нормы $\mu < \mu_0 - \Delta_\mu$	Норма $\mu_0 - \Delta_\mu \leq \mu < \mu_0 + \Delta_\mu$	Больше нормы $\mu \geq \mu_0 + \Delta_\mu$
Меньше нормы $t < t_0 - \Delta_t$	1	0,5	0
Норма $t_0 - \Delta_t \leq t < t_0 + \Delta_t$	0,5	0	0,5
Больше нормы $t \geq t_0 + \Delta_t$	0	0,5	1

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс распылительной сушки суспензии водоросли *Chlorella vulgaris* при производстве порошка является сложным и трудноформализуемым с точки зрения управления объектом. Снижение дисперсии показателей качества сухого продукта возможно на основе совершенствования системы управления сушкой. При управлении температурой сушильного агента предлагается применять коррекцию на основе измерения вязкости суспензии после фильтрации. Прибор для измерения вязкости вводится в структуру системы управления как составляющая контура регулирования температуры сушильного агента. Нечеткий регулятор температуры работает по трем термам каждой из переменных «Температура» и «Вязкость» с выработкой управляющего воздействия на основе прямоугольных функций принадлежности. Предложенные правила фазсификации и дефазсификации для регулирования температуры работают на множестве «норма», «меньше нормы», «больше нормы». Это множество целесообразно применять при оценке показателей качества сухого порошка на верхнем уровне управления для обеспечения условий информационной совместимости локальных регуляторов и машин принятия решений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Николаева Ю.В., Ефимова М.В. Микроскопическая водоросль хлорелла // *Молодой ученый*. 2022. № 24 (419). С. 111–113.
2. Ахремчик О.Л., Мурзахметов В.С. Моделирование роста штамма *Chlorella Vulgaris* в лабораторном биореакторе. *Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения: Материалы VI Всероссийской науч. конференции*. Тольятти: ТГУ, 2023. С. 29–34.
3. Шевцов А.А., Муравьев А.С. Модельные представления процесса распылительной сушки фильтрата спиртовой барды на основе уравнений Навье – Стокса // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2015. № 4. С. 11–16.

4. Дивеев А.И., Софронова Е.А. Задача структурного синтеза системы автоматического управления // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2007. № 1. С. 48–58.

5. Максименко Ю.А., Феклунова Ю.С., Теличкина Э.Р., Пшеничная Н.Э. Кинетика распылительной сушки растительных материалов // *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания*. 2016. № 3. С. 77–81.

6. Kalenov S.V., Gordienko M.G., Murzina E.D., et al. Halobacterium Salinarum Storage and Rehydration after Spray Drying and Optimization of the Processes for Preservation of Carotenoids // *Extremophiles*. 2018. V. 22. № 3. P. 511–523.

7. Патент РФ 2760922. *Автоматический капиллярный вискозиметр* / Илясов Л.В., Кузнецов Н.В.; Заявл. 12.04.2021. Оpubл. 01.12.2021. Бюл. № 34.

8. Mann G.K.I., Bao-Gang Hu., Gosine R.G. Analysis of Direct Action Fuzzy PID Controller Structures // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 1999. Part B. V. 29. Is. 3. P. 371–388.

**Для цитирования:** Ахремчик О.Л., Кузнецов Н.В. Управление сушкой суспензии хлореллы с учетом вязкости // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 2 (22). С. 100–107.

## **CONTROL OF DRYING OF CHLORELLA SUSPENSION TAKING INTO ACCOUNT VISCOSITY**

O.L. AKHREMCHIK, Dr. Sc., N.V. KUZNETSOV, postgraduate

Tver State Technical University,  
22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver, e-mail: axremchic@mail.ru

The results obtained during structural synthesis of microalgae suspension drying control systems are presented. Reduction of dispersion of chlorella powder quality parameters is ensured by using corrective action by viscosity of suspension in temperature controller of drying agent. Viscosity is measured before the slurry is fed to the spray nozzle further incorporated into the instrument control system. The structure of the suspension viscosity meter is considered. As the temperature controller, it is proposed to use a fuzzy temperature controller of the drying agent. Linguistic assessment of controlled and corrective actions is carried out according to three terms on the basis of rectangular belonging functions.

*Keywords:* control, viscosity, temperature, variable, fuzzy regulator, drying, suspension, structure.

Поступила в редакцию/received: 25.02.2024; после рецензирования/revised: 29.02.2024;  
принята/accepted: 01.03.2024

**ВЕСТНИК  
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Серия «Технические науки»**

**Научный рецензируемый журнал  
№ 2 (22), 2024**

**Print ISSN 2658-5030  
Online ISSN 2687-0029**

Редактор М.Б. Юдина  
Корректор С.В. Зорикова

---

Подписано в печать 31.05.2024

Формат 60 x 84/8

Физ. печ. л. 13,5

Тираж 500 экз.

Цена свободная

Усл. печ. л. 12,56

Заказ № 274

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 11,75

С – 108

---

Редакционно-издательский центр  
Тверского государственного технического университета  
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22  
Отпечатано в ООО «Наукоемкие технологии»  
Центр инженерной печати  
170024, Тверь, ул. Академическая, д. 14