

*На правах рукописи*

*Ворошица*

**ВОРОНИН Николай Владимирович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ  
МАГНИТО-ТЕРМИЧЕСКОГО АРМИРОВАНИЯ  
ПОЛИМЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ ВАКУУМНЫХ  
НАСОСОВ И УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ  
ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОСИСТЕМ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН**

Специальность 4.3.1. – Технологии, машины и оборудование  
для агропромышленного комплекса (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Мичуринск-Наукоград, 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» на кафедре «Механика и инженерная графика».

**Научный руководитель**

***Родионов Юрий Викторович,***

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», кафедра «Механика и инженерная графика»

**Официальные оппоненты:**

***Жачкин Сергей Юрьевич,***

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», кафедра технологии машиностроения

***Гончарова Юлия Александровна,***

кандидат технических наук, ассистент кафедры МТ8 «Материаловедение» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

**Ведущая организация**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва»

Защита диссертации состоится 6 октября 2023 г. в 12 часов 30 минут на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 35.2.022.02 на базе ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет» по адресу: 393760, Тамбовская обл., г. Мичуринск, ул. Интернациональная 101, корпус 1, зал заседаний диссертационных советов, тел./факс (47545)3-88-13, доб. 3-82, e-mail: dissov@mgau.ru.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ и на сайте университета: <https://www.mgau.ru/>, а также на официальном сайте ВАК Минобрнауки РФ: <https://vak.minobrnauki.gov.ru/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, с указанием индекса, почтового адреса, телефона, электронной почты и сайта организации, фамилии, имени, отчества лица, подготовившего отзыв, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



***Криволапов Иван Павлович***

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В процессе эксплуатации различных машин и агрегатов их детали и узлы подвергаются влиянию множества факторов (атмосферные осадки, кислоты, влажность воздуха и многие другие), которые приводят к заметному износу и, как следствие, снижению надежности и работоспособности. Вместе с этим растет степень применяемости полимерных материалов в различных узлах машин и агрегатов. К примеру, лопасти рабочих колес жидкостных насосов, уплотнители, лопасти воздуходувок во многих случаях изготавливаются из различного рода полимеров. Вместе с этим низкая поверхностная твердость и износостойкость зачастую переводят пластмассовые детали в разряд расходных, а замена некоторых изношенных деталей требует проведения длительной и дорогостоящей разборки и последующей сборки узлов, где эта деталь установлена.

В связи с этим одним из перспективных направлений в АПК является улучшение эксплуатационных характеристик деталей машин и оборудования из полимерных материалов различными методами. Также становятся актуальны комплексные исследования, направленные на разработку и совершенствование технологий упрочнения деталей из полимерных материалов, используемых в АПК, с целью улучшения их эксплуатационных параметров.

**Степень разработанности темы.** Вопросам, касающимся исследований характеристик полимерных материалов и композитов на их основе, изготовления деталей машин из них, а также восстановления изношенных деталей сельхозтехники, посвящены труды Г. С. Баронина, С. Ю. Жачкина, Р. И. Ли, А. И. Завражнова, Ф. А. Кирсанова, Ю. В. Родионова, В. М. Бузника, М. Л. Кербера, А. М. Столина, В. К. Крыжановского, А. В. Котина, В. В. Кузнецова, С. А. Величко и многих других отечественных ученых.

Полимерные материалы и композиты на их основе широко используются в АПК для изготовления различных деталей машин и механизмов – элементов насосного оборудования, уплотнителей и т.д. Помимо самих полимеров и композитов, широко применяются и металлизированные различными способами пластики. Однако вопрос все еще остается недостаточно проработанным, так как большинство таких способов либо имеют низкую технологичность, либо являются сложными в реализации или высокотоксичными.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90298/20 «Разработка метода магнито-термического упрочнения полимеров ферромагнитными порошками различной дисперсности для деталей машин широкого спектра применения» на кафедре «Механика и инженерная графика» Тамбовского государственного технического университета.

**Цель исследования.** Повышение надежности лопаток рабочих колес и уплотнительных элементов гидросистем сельскохозяйственных машин, изготовленных из полимерных материалов, с помощью метода магнито-термического поверхностного армирования.

### **Задачи исследования:**

- оценить актуальность технологий упрочнения и металлизации полимерных деталей, используемых в АПК;
- разработать математическую модель процесса магнито-термического поверхностного армирования, а также методику расчета действующих на лопатку жидкостнокольцевого вакуумного насоса сил;

- провести сравнительный анализ свойств различных ферромагнитных материалов и полимеров для реализации процесса магнито-термического армирования, а также установления теоретических границ их применимости;
- провести экспериментальные исследования физико-механических характеристик армированных образцов и проверку корреляции теоретического анализа с полученными результатами;
- определить технологические параметры получения армированного слоя поверхности полимерной детали, полученного методом магнито-термического армирования, а также определить соответствующее оборудование и оптимальные режимные параметры технологического процесса армирования полимерных деталей АПК;
- провести оценку технико-экономической эффективности применения технологии и внедрения в производство.

**Научная новизна результатов исследования:**

- технология и режимы магнито-термического армирования для улучшения эксплуатационных характеристик полимерных лопаток рабочих колес и уплотнительных элементов гидросистем сельскохозяйственных машин;
- математическая модель, описывающая процесс внедрения ферромагнитных частиц в поверхность полимерных деталей;
- исследование влияния характеристик полимеров, армирующего материала и параметров технологического процесса армирования полимерных лопаток рабочих колес и уплотнительных элементов гидросистем сельскохозяйственных машин на структуру и свойство получаемого армированного слоя;
- исследование прочности характеристик армированных деталей;
- проработка различных вариантов реализации технологии магнито-термического поверхностного армирования поверхности лопаток рабочих колес и уплотнительных элементов гидросистем сельскохозяйственных машин из термопластов и реактопластов.

**Теоретическая значимость работы.** Теоретическая значимость работы заключается в:

- обосновании повышения механических свойств поверхности полимерных лопаток рабочих колес и уплотнительных элементов гидросистем сельскохозяйственных машин после магнито-термического армирования;
- разработке установки, реализующей процесс магнито-термического поверхностного армирования полимерных лопаток рабочих колес и уплотнительных элементов гидросистем сельскохозяйственных машин;
- использовании результатов исследований в реальных условиях эксплуатации насосного оборудования АПК.

**Практическая значимость** заключается в разработке технологии магнито-термического поверхностного армирования лопаток рабочих колес и уплотнительных элементов гидросистем сельскохозяйственных машин, изготовленных из полимерных материалов, частицами ферромагнетиков различной дисперсности и проработке технологической оснастки для использования данной технологии, а также повышении ключевых критериев надежности армируемых деталей.

**Объект исследования.** Технология магнито-термического поверхностного армирования; образцы и детали, армированные магнито-термическим способом; установка для магнито-термического поверхностного армирования.

**Предмет исследования.** Механические свойства деталей, армированных магнито-термическим методом; влияние армирующих элементов, конструктивных и технологических параметров установки магнито-термического поверхностного армирования на механические свойства армирующих покрытий полимерных деталей.

**Методология и методы исследования.** Методологическая, теоретическая и эмпирическая базы исследований представлены теоретическими исследованиями на основе математического моделирования, теории прочности и долговечности полимерных материалов, экспериментальными исследованиями деформационно-прочностных, триботехнических свойств армированных полимерных деталей.

**Положения, выносимые на защиту:**

- теоретические предпосылки повышения механических характеристик поверхности полимерных деталей лопаток рабочих колес и уплотнительных элементов гидросистем сельскохозяйственных машин при использовании технологии магнито-термического поверхностного армирования;
- результаты экспериментальных исследований влияния технологических факторов на структуру и свойства армированного поверхностного слоя полимеров;
- технология магнито-термического поверхностного армирования полимерных деталей насосного оборудования АПК и оценка ее технико-экономической эффективности.

**Степень достоверности и апробация результатов исследования** подтверждается использованием современных методик и оборудования, достаточным количеством экспериментов, соответствием экспериментальных данных теоретическим исследованиям, публикацией результатов в журналах, изучением работ других авторов.

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на конференциях:

XI Национальная научно-техническая конференция (Москва, 2021); XIV Межвузовская научная студенческая конференция «Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития» (Тамбов, 2019); II Международная научно-практическая конференция «Цифровизация агропромышленного комплекса» (Тамбов, 2020); X Международный промышленный форум «Инженеры будущего – 2022» (в рамках XII Национальной научно-технической конференции); заседания кафедры «Механика и инженерная графика» (Тамбов, 2018 – 2023).

**Личный вклад автора.** Выбор темы работы обусловлен наблюдающейся в последние годы тенденцией к оптимизации и снижению металлоемкости производства, в связи с чем расширяется использование полимерных материалов. В данной работе автором выполнены теоретические и экспериментальные исследования – литературный обзор, создание математической модели, проведение экспериментов по нанесению металлического покрытия и проверке характеристик металлизированных изделий, а также анализ результатов исследований и разработка рекомендаций по внедрению разработанной технологии.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Диссертация соответствует паспорту научной специальности 4.3.1. – Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки), пункты 6, 20 и 21.

**Публикации.** По результатам выполненной работы опубликовано 22 печатных работы, в том числе 3 публикации, включенные в систему цитирования Scopus/Web of Science, 6 публикаций в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК Министерства науки и высшего образования, и 3 патента на изобрете-

ние и полезную модель РФ. Общий объем публикаций составляет 15,94 печ. л., автору принадлежит 9,45 печ. л.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 162 страницах машинописного текста, содержит 42 рисунка, 6 таблиц, 128 литературных источников. Приложения включают 15 наименований и представлены на 15 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой темы и основные положения, которые выносятся на защиту.

В **первой главе «Анализ состояния вопроса, цель и задачи исследований»** дан анализ используемых в агропромышленном комплексе полимеров и изделий из них, описаны основные технологии металлизации изделий и упрочнения.

Агропромышленный комплекс является одним из лидеров по использованию полимерных изделий. При изготовлении деталей сельскохозяйственных машин и оборудования (рабочие колеса насосов, уплотнительные элементы гидросистем и др.) активно применяются не только чистые полимеры, но и созданные на их основе композитные материалы. С учетом этого самыми распространенными являются термопластичные полимеры (полиэтилен, фторопласт и т.д.), занимающие более трех четвертей мирового рынка. Полимеры по соотношению прочности к плотности превосходят стали и, кроме этого, часто используются для ремонта и восстановления изношенных деталей и узлов.

Механические характеристики полимерных материалов можно повысить различными способами, в число которых входит металлизация.

Существующие способы металлизации можно разделить на три большие группы:

- механические (заранее сформированное покрытие скрепляется с покрываемой поверхностью);
- физические (предварительно превращенный в пар или жидкость металл наносится на покрываемую поверхность, где он снова становится твердым и образует требуемое покрытие);
- химические или химико-электролитические (сначала во время химической реакции на полимере формируется проводящий слой, после на этот слой методами гальваники или химии осаждается металл).

Из всех трех групп наибольшее распространение получили три способа: напыление жидкого металла, вакуумное напыление и химико-электролитическая металлизация. Указанные способы характеризуются следующими недостатками: первый имеет высокую энерго- и металлоемкость, второй отличается высокой сложностью и необходимостью поддержания вакуума в рабочей зоне, третий требует использования специальных растворов или расплавов, т.е. является токсичным. Поэтому вопрос металлизации полимерных изделий недостаточно изучен и требует исследований. Также известны четыре основных способа упрочнения полимерных материалов: ориентационное упрочнение, равноканальная угловая экструзия (РКУЭ), термическая обработка и создание полимерных композиционных материалов. В настоящий момент наиболее распространенным является последний из перечисленных. Устранение недостатков этих способов возможно применением магнито-термического поверхностного армирования.

На основе проведенного анализа сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе «Технология магнито-термического поверхностного армирования и расчет контактных и изгибных напряжений деталей машин и оборудования АПК» приведены теоретические исследования моделирования процесса внедрения ферромагнитной частицы в поверхность полимера. Также приведены методики расчета напряжений, действующих на полимерные лопатки рабочего колеса и зубья корпуса ЖВН.

**Движение ферромагнитной частицы в процессе армирования.** Задача математической модели состоит в описании движения частицы ферромагнитного материала (никеля, железа/стали или кобальта) в поверхностном (находящемся фактически в состоянии расплава) слое полимера (в данном случае – полипропилен с температурой плавления 413 К и плотностью 910 кг/м<sup>3</sup>) под воздействием сил, действующих на частицу, и оказывающих влияние на процесс внедрения.

Базовым уравнением в математической модели считаем общее уравнение движения ферромагнитной частицы в вязкой среде поверхностного слоя полимера. Оно имеет вид

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{1}{2} c S_{\text{ч}} \rho \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + \frac{\chi_{\text{уд}}}{\mu_0} \frac{\partial x}{\partial t} B \frac{\partial B}{\partial x} + mg - \rho S_{\text{ч}} \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} - \left| -6\pi r_{\text{ч}} \mu \frac{\partial x}{\partial t} \right| - \sigma l - \rho_{\text{ж}} g V_{\text{ч}}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса частицы, кг;  $V_{\text{ч}}$  – объем частицы, м<sup>3</sup>;  $\chi_{\text{уд}}$  – удельная магнитная восприимчивость, м<sup>3</sup>/кг;  $B$  – индукция магнитного поля, Тл;  $\rho$ ,  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность вещества и жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $r_{\text{ч}}$  – радиус частицы, м;  $\mu_{\text{ж}}$  – динамическая вязкость жидкости, Па·с;  $v_{\text{ч}}$  – скорость частицы, м/с;  $S_{\text{ч}}$  – площадь поперечного сечения частицы, м<sup>2</sup>;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения расплава полимера, Н/м;  $l$  – глубина внедрения частицы, м;  $c$  – коэффициент сопротивления частицы (безразмерный);  $V$  – объем жидкости, м<sup>3</sup>.

Для описания процесса конвективного теплообмена с учетом указанных допущений используем уравнение Фурье-Кирхгофа:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

где  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$  – скорость движения потока воздуха по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ , м/с.

Также используем уравнение неразрывности, которое в случае несжимаемой жидкости принимает вид:

$$\frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \frac{\partial \omega_y}{\partial y} + \frac{\partial \omega_z}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

где  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$  – скорость движения потока жидкости по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ , м/с;

Связь между количеством тепла, передаваемым потоком нагретого воздуха, и поверхностью теплообмена определяется основным уравнением теплопередачи:

$$\Delta Q = K_{\text{л}} \Delta S \Delta T \Delta t, \quad (4)$$

где  $\Delta Q$  – количество переданного тепла, Дж;  $K_{\text{л}}$  – локальный коэффициент теплопередачи между средами, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\Delta S$  – элемент поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $\Delta t$  – время теплообмена, с.

Мощность теплового потока от нагретого воздуха к частице никеля и поверхности полимера определяется по формуле

$$Q = \alpha S \Delta T, \quad (5)$$

где  $\alpha = \alpha_k + \alpha_p$  – суммарный коэффициент теплоотдачи на границе воздух – поверхность частицы, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $S$  – площадь поверхности частицы, м<sup>2</sup>.

**Расчет контактных и изгибных напряжений.** Важность теоретического анализа, а также корректировки проверочного расчета конструкции ЖВН обусловлена особенностями использования полимерных материалов для повышения кавитационной стойкости, а также снижения металлоемкости и потерь мощности.

В зависимости от условий эксплуатации требуются конкретные значения деформаций и методики расчета напряжений для полного соблюдения условия прочности. Однако здесь задача усложняется, поскольку в случае использования полимерных материалов необходимо учитывать их особенности и различия по характеристикам, т.е. в одной ситуации наблюдается, к примеру, явная зависимость деформаций от времени, а в другой – отсутствие пропорциональности между деформациями и их отклонениями.

Контактные напряжения  $\sigma_H$  вычисляем по формуле:

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{q}{\rho_{\text{пр}}} \frac{2E_1E_2}{\pi[E_1(1-\mu_2^2) + E_2(1-\mu_1^2)]}}, \quad (6)$$

где  $E_1, E_2$  – модули упругости используемых материалов лопаток рабочего колеса и зубьев корпуса, МПа;  $\mu_1, \mu_2$  – коэффициенты Пуассона используемых лопаток рабочего колеса и зубьев корпуса.

Формула также подлежит корректировке, если используются одинаковые полимеры при создании деталей, при этом не имеет значения, оба они армированные или исходные. Тогда коэффициент Пуассона и модуль упругости принимаем как общие. Таким образом, формула (6) принимает вид:

$$\sigma_H = 0,5642 \sqrt{\frac{q}{\rho_{\text{пр}}} \frac{E_{\text{пол}}}{(1-\mu_{\text{пол}}^2)}}. \quad (7)$$

где  $E_{\text{пол}}$  – модуль упругости используемого армированного полимера, МПа;  $\mu_{\text{пол}}$  – коэффициент Пуассона армированного полимера.

Учитываем дополнительно изменение коэффициента Пуассона из-за нагрева деталей. Кроме этого, принимаем во внимание различные физико-механические свойства используемых полимеров. Так возможно применение не только исходных полимеров, но и композитов на их основе.

Удельную распределенную нагрузку определяем, как

$$q = \frac{F_{t1} K_H}{b_w \cos \alpha_w} = \frac{2T_1 K_H}{d_{w1} b_w \cos \alpha_w}, \quad (8)$$

где  $T_i$  – текущее значение вращающего момента на графике циклограммы моментов нагружения, Н/м;  $d_{w1}$  – начальный диаметр корпуса, мм;  $\alpha_w$  – угол зацепления, рад;  $K_H$  – коэффициент расчетной нагрузки;  $b_w$  – ширина венца колеса, мм.



Величины расчетных контактных напряжений одинаковы для рабочего колеса и корпуса ЖВН. Поэтому расчет выполняют для того из звеньев пары, у которого меньше допускаемое напряжение (чаще это бывает зуб на корпусе).

Допускаемые изгибные напряжения при расчете на усталость определяются по формуле:

$$[\sigma_F] = \frac{\sigma_{F\lim}}{S_F} Y_N, \quad (9)$$

где  $S_F$  – коэффициент безопасности;  $Y_N$  – коэффициент долговечности;  $\sigma_{F\lim}$  – предел выносливости зубьев по напряжениям изгиба, МПа.

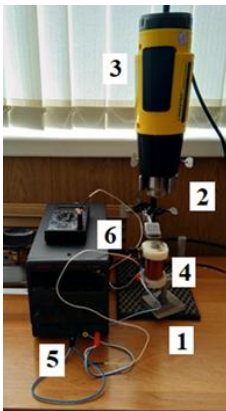
В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований» описаны экспериментальная установка, общая и частные методики исследований.

Целью проведения экспериментальных исследований является проверка результатов теоретического анализа и моделирования процесса магнито-термического армирования.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Определить оптимальный размер частиц и материал порошка металла, тип базового полимера;
2. Исследовать влияние различных параметров экспериментальной установки на качество получаемой поверхности;
3. Исследовать механические и общие эксплуатационные характеристики полученных армированных деталей;
4. Получить экспериментальные данные, необходимые для проектирования и дальнейшей доработки технологии магнито-термического поверхностного армирования.

Экспериментальная установка для прототипирования технологии показана на рис. 1.



**Рис. 1. Экспериментальная установка для реализации технологии магнито-термического армирования**

Она имеет следующие основные составляющие:

- 1) вертикальная штанга (позиция 1);
- 2) держатели (позиция 2);
- 3) термопистолет LODESTAR L502310 (позиция 3);
- 4) катушка-электромагнит на 480 витков (позиция 4);
- 5) источник постоянного тока P305D (позиция 5);
- 6) мультиметр DT-838 с термопарой типа ХК (позиция 6).

Для контроля стабильности уровня магнитной индукции катушки используем измеритель магнитной индукции ИМИ-3.

С помощью металлографического микроскопа Carl-Zeiss Iena Neophot и микроинтерферометра МИИ-4 осуществляем анализ структуры поверхности полимера.

Исходным ферромагнетиком для экспериментов является порошок никеля ПНК–УТЗ (размерность 40 мкм). В качестве исходного полимера выступают образцы из полипропилена Бален 01270. Фторопласт-4 не выбран по причине высокой температуры плавления.

В качестве деталей для армирования взяты съемная лопасть рабочего колеса экспериментального ЖВН и прижимное уплотнение вала.

Эксперимент для определения параметров технологии металлизации поверхности полимеров проводим по следующей схеме:

- 1) размещение металлируемой детали в рабочей зоне установки;
- 2) подача минимального напряжения и силы тока (0,5...1 А) на электромагнит для предотвращения уноса ферромагнитного порошка;
- 3) ручное нанесение ферромагнитного порошка на поверхность детали, перевод электромагнита в режим «силового удержания» (сила тока – 1...2 А);
- 4) включение теплогенератора, перевод электромагнита в режим внедрения (сила тока – 4...4,5 А) после достижения необходимого состояния поверхности (слой расплава толщиной до 60...70 мкм) и температуры (483...513 К);
- 5) выдержка в течение 90 с, выключение теплогенератора, кратковременный перевод электромагнита в режим «дожатия» (сила тока – 5...5,5 А), затем отключение электромагнита, удаление излишков порошка, охлаждение и извлечение армированной детали.

Магнитное и тепловое поля создаются соответственно катушкой-электромагнитом и термопистолетом с регулировкой температуры от 373 до 723 К и скорости нагретого воздушного потока (9,8...12 м/с). При оптимальных для процесса металлизации параметрах (температура 450...513 К, напряжение – 10 В, сила тока – 4 А) площадь поперечного сечения теплового потока – 300 мм<sup>2</sup>.

В четвертой главе «**Результаты экспериментальных исследований и подбор материалов для изготовления элементов оборудования**» приведены результаты экспериментальных исследований.

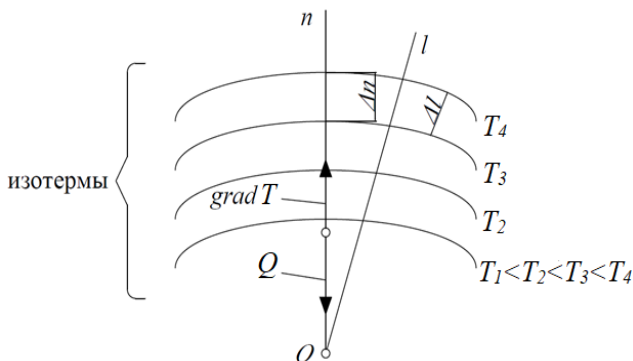
**Исследование термического и магнитного полей.** При постоянном расходе воздуха тепломассоперенос описан как стационарное трехмерное температурное поле. Оно задается уравнением, связывающим значение температур в каждой точке теплового поля со значением координат этой точки и имеет вид соотношения, зависящего от координат пространства по отношению к точке источника тепла:  $T = T(x, y, z)$ . При этом наиболее резкое изменение температуры имеет место в направлении по нормали к изотермической поверхности (рис. 2).

При этом градиент температуры определяется в виде производной значения  $T$  по нормали к изотермической поверхности:

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta T}{\Delta n} \right) = \frac{\partial T}{\partial n} = \text{grad } T. \quad (10)$$

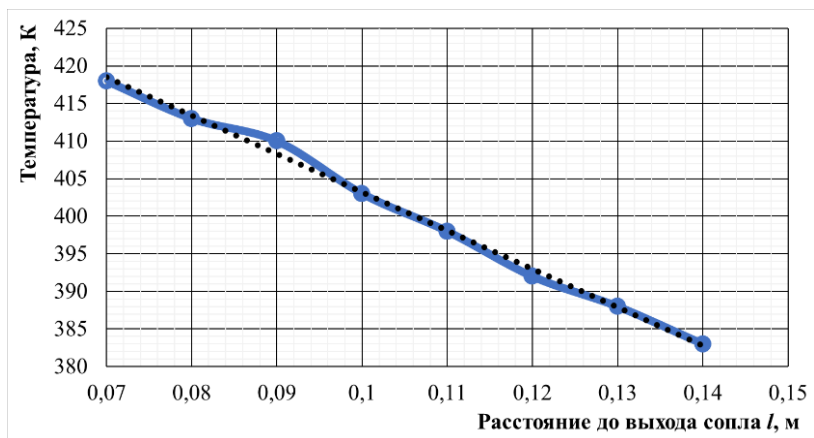
Значение  $\text{grad } T$  определяем из графика (рис. 3). Оно составляет 6 К/см.

Оптимальное расстояние от среза сопла до поверхности полимерного образца выбирается в зависимости от свойств полимера и способности металлического порошка удерживаться на поверхности магнитным полем. При близком расположении среза сопла наблюдается его намагничивание. Исходя из этого, оптимальное расстояние от торцевой поверхности сопла источника тепла при постоянном расходе воздуха 350 л/мин и температуре у сопла 603 К составляет 100 мм.



**Рис. 2. Графическое представление изменения температуры при удалении источника тепла от поверхности пластины полимера:**

$N$  – нормаль к поверхности полимерной пластины;  $\Delta n$  – расстояние по нормали между изотермами;  $\Delta l$  – расстояние между изотермами вдоль линии отклонения  $l$  от нормали;  $Q$  – направление распространения теплоты



**Рис. 3. Зависимость температуры на поверхности пластины от расстояния до выхода сопла:**

линия с маркерами – экспериментальные данные;  
пунктирная линия – теоретическая зависимость

На таком расстоянии сохраняется температура 513 К воздействующего на полимер теплового потока, а обеспечивается достаточное проникновение частиц никелевого порошка со средней дисперсностью частиц 40 мкм в поверхность лопатки, а также отсутствует заметное влияние магнитного поля соленоида на металлические части теплового пистолета.

Для выбора оптимальных характеристик индукции и напряженности магнитного поля определяем его минимально допустимое значение для удержания частиц ферромагнетика на поверхности полимера.

Напряженность магнитного поля  $H$  в любой точке пространства возрастает с увеличением  $I\omega$  и уменьшается с ростом длины магнитной линии  $l$ :

$$H = \frac{I\omega}{l}, \quad (11)$$

где  $\omega$  – число витков катушки.

Выражение для индукции магнитного поля:

$$dB = \mu_0 \frac{1}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r\bar{r}}, \quad (12)$$

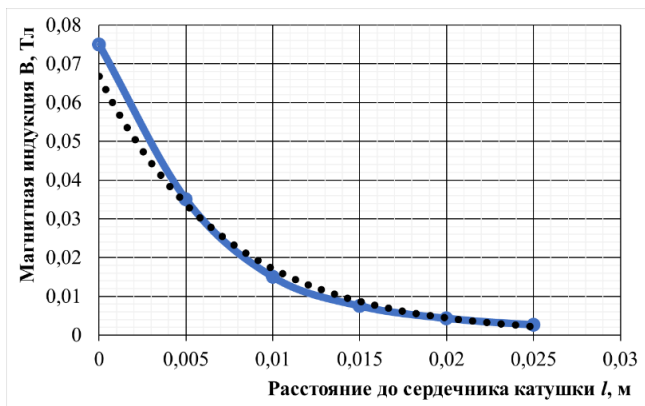
где  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $r$  – расстояние между частицей и электромагнитом, м;  $\alpha$  – угол между направлением движения частицы и нормалью к поверхности пластины, рад.

Исходя из вышеуказанных соотношений, рассматриваем изменение индукции магнитного поля от расстояния от торца сердечника катушки с током по экспериментальному графику (рис. 4).

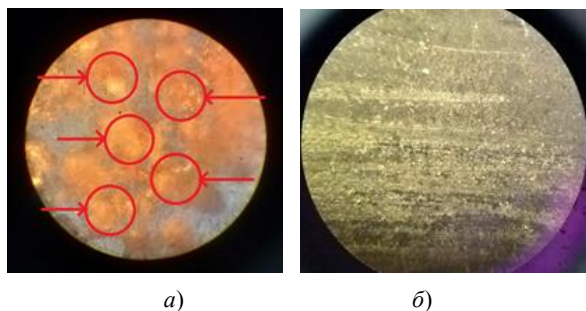
Так как толщина пластин не превышает 2 мм, то значение индукции катушки у торца магнитного сердечника составляет 0,0042 Тл. При меньших значениях индукции вне зависимости от температуры нагрева ферромагнитный порошок не удерживается на поверхности и не внедряется. Это соответствует силе тока на электромагните 1,5 А при напряжении 4 В.

В ходе экспериментов подтверждается явление механического внедрения частиц порошка никеля внутрь нагретой до 463...473 К поверхности полимерной пластины. Этот эффект усилен действием магнитного поля. При увеличении значения напряженности магнитного поля (больше значение магнитной индукции В), процесс внедрения протекает эффективнее.

Для улучшения внедрения частиц порошка никеля внутрь поверхности полимерной пластины на поверхности полимерных образцов создается шероховатость поверхности со значениями от 5 до 15 мкм.



**Рис. 4. Зависимость индукции магнитного поля от расстояния до сердечника катушки:**  
 линия с маркерами – экспериментальные данные,  
 пунктирная линия – теоретическая зависимость



**Рис. 5. Микроструктуры поверхности образцов:**

*а* – полипропилен с нанесенным никелем, увеличение  $500\times$ , шероховатость Ra10;  
*б* – сталь 10 после абразивного воздействия армированного образца. Увеличение  $30\times$

Микроструктура поверхности образца представлена на рис. 5.

Анализ поверхности полимерного образца показывает (рис. 5, *а*), что проникшие частицы порошка железа занимают более 50% поверхности образца. При этом глубина проникновения частиц составляет в среднем 60 мкм. Равномерность распределения частиц на поверхности образца зависит от температуры, магнитного поля и времени воздействия, а форма распределения частиц определяется напряженностью магнитного поля.

Также выявлено, что поверхностная твердость модифицированного полипропилена сопоставима с твердостью низкоуглеродистой стали. На поверхности пластины из стали 10 после воздействия на нее модифицированным поверхностным слоем полипропилена с усилием 10 Н и движением полипропиленом со скоростью 50 мм/с были видны четкие абразивные полосы (рис. 5, *б*).

Повышение коэффициента трения при армировании поверхности (табл. 1) обусловлено физическими характеристиками сравниваемых материалов.

Твердость поверхности после армирования сопоставима с твердостью армирующего материала. Расхождение в твердости возникает из-за попадания индентора между частицами никелевого порошка.

Повышение прочности на растяжение обусловлено практически отсутствующим растяжением внедренных частиц никеля, удерживаемых структурированным полимером и сцепленным с ними за счет высокой поверхностной энергии частиц никеля и расплавленной поверхности полимера.

### **1. Сравнение некоторых механических характеристик исходного и армированного полимера**

Характеристика полимера	Исходный полимер	Армированный полимер
Твердость по Бринеллю, МПа	63	355
Предел прочности на растяжение, МПа	40	47
Коэффициент трения по стали	0,41	0,62

**Метрологическая оценка достоверности.** Основой математической модели является баланс сил, внедряющих частицу в полимер, и противодействующих этому внедрению со стороны поверхности. Для упрощения обозначим  $ma$  как  $F_{BH}$ , тогда достоверность рассчитывается через оценку влияния погрешности определения каждого из факторов (в правой части уравнения) на общие показатели:

$$\Delta F_{BH} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial F}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}. \quad (13)$$

Исходя из погрешности определения параметров воздействия на внедряемую в полимер частицу, а также принимая во внимание, что погрешность установки и определения тока и напряжения питания катушки электромагнита входит в погрешность измерения магнитной индукции, а погрешность определения радиуса – в погрешность определения площади поперечного сечения, рассчитываем приближительное значение погрешности силы внедрения частицы:

$$\Delta F = \sqrt{(PII)^2 + (PII)^2 + (PIV_{возд})^2 + (Pit)^2 + (PI m_{\text{ч}})^2 + (PIB)^2 + (PI P_{III})^2 + (PIV_{\text{ч}})^2 + (PI \mu_{PI})^2 + (PI S_{\text{п.с.ч}})^2}. \quad (14)$$

Итоговая погрешность  $\Delta F_{BH} = 8...14\%$ , что подтверждает правильность выполненных измерений.

В пятой главе «Оценка эффективности внедрения технологии магнито-термического поверхностного армирования и оборудования для ее реализации» описана разработанная технология металлизации лопатки рабочего колеса и уплотнения ЖВН и дана ее экономическая оценка.

Технология магнито-термического поверхностного армирования полимерных изделий происходит по схеме, показанной на рис. 6.



**Рис. 6. Схема процесса магнито-термического поверхностного армирования**

Также она предполагает два сценария использования: для металлизации уже готовых изделий и изделий, находящихся на этапе изготовления. Во втором случае требуется модернизация электромагнитной системы и создание пресс-формы для конкретной детали.

Разработанная технология и установка магнито-термического поверхностного армирования полимерных деталей оценена и рекомендована к внедрению на различных предприятиях и КФХ Тамбовской области, в том числе ООО «ТЕХЛАЙН» и ООО «РСК». Для оценки надежности армированных деталей проведены эксплуатационные испытания насосного оборудования. Годовой экономический эффект от внедрения технологии составляет в среднем 525 тыс. руб. при повышении ключевых критериев надежности армированных деталей в 1,2–1,7 раза.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В рамках литературного обзора определено современное состояние научных исследований в области технологий и оборудования для переработки и упрочнения/металлизации деталей машин и оборудования АПК из полимерного материала. Сделаны основные выводы об актуальности проводимых исследований и определены направления работы, поставлены соответствующие задачи.

2. Разработаны базовые модели (физическая и математическая), позволяющие описать процесс внедрения ферромагнитной частицы в поверхностный слой полимерной детали. Однако эта же модель не в полной мере решает вопрос о внедрении в поверхность термопластичных полимеров частиц металлов и сплавов, не обладающих ферромагнитными свойствами, а также получения армированных поверхностей изделий из реактопластов. Усовершенствованы методики расчета и проведено моделирование контактных и изгибных напряжений на примере лопаток рабочего колеса жидкостнокольцевого вакуум-насоса.

3. Проведен расчет значений сил, оказывающих воздействие на ферромагнитную частицу, и получены результаты экспериментальных исследований с учетом анализа изменения свойств поверхности в процессе изменения параметров технологического процесса армирования. Как показал расчет, магнитная сила внедрения более, чем в 1000 раз превышает суммарное значение сил, противодействующих внедрению.

4. Проведенные механические и триботехнические испытания показали устойчивость армированной поверхности полимера к истиранию (скорость истирания снизилась с 0,82 до 0,16 мкм/ч) при сухом трении. По результатам экспериментальных данных определены оптимальные режимы работы экспериментальной установки для получения наиболее качественно армированной поверхности при минимальных затратах времени и энергии. Оптимальная сила тока – 4,5 А, напряжение – 10 В, расстояние от армируемой поверхности до сопла теплогенератора – не менее 100 мм, диапазон температур процесса армирования – от 453 до 523 К в зависимости от материала детали. Твердость поверхности по Бринеллю выросла с 63 до 355 МПа, коэффициент трения вырос (с 0,41 до 0,62), пределы прочности на растяжение, сжатие и изгиб выросли в среднем на 10...15%. Эксплуатационные испытания на насосе малой производительности показали повышение среднего

рабочего ресурса полипропиленовых лопаток рабочего колеса с 956 до 4123 ч и увеличение количества циклов сборки-разборки без замены уплотнения с 3 до 12.

5. Описаны конструкции установок магнито-термического армирования полимерных деталей машин и аппаратов АПК для металлизации их в процессе производства либо уже готовых. Использование разработанных технологий магнито-термического армирования поверхностей полимерных материалов позволяет повысить средний ресурс работы лопаток рабочего колеса и уплотнения вала ЖВН в 3,5...4,4 раза при адекватном повышении себестоимости изделия.

6. Доказана экономическая эффективность применения разработанных технологий и изготовления изделий с их применением. Разработанная технология оценена и рекомендована к внедрению на различных предприятиях и КФХ. Годовой экономический эффект от внедрения технологии и соответствующей установки с учетом одноименклатурного производства составил в среднем 525 тыс. руб. при повышении ключевых критериев надежности армированных деталей в 1,2–1,7 раза.

**Рекомендации производству.** С помощью разработанной технологии рекомендуется армировать полимерные детали с плоской рабочей поверхностью для улучшения ее твердости, износостойкости и других поверхностных свойств.

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** Расширение ассортимента полимерных изделий, металлизированных магнито-термическим методом. Разработка технологии магнито-термического поверхностного армирования полимерных деталей сложной формы.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*В издании, включенном в систему цитирования (библиографическую базу) SCOPUS и Web of Science:*

1. Переработка репчатого лука сорта стригуновский местный при помощи экстрагирования / Ю. В. Родионов, Г. В. Рыбин, А. А. Гуськов, Д. В. Никитин, С. И. Данилин, **Н. В. Воронин** // Аграрный научный журнал. – 2023. – № 2. – С. 142 – 147.

2. Mathematical Model of the Magnetic-Thermal Surface Reinforcement of Polymeric Materials with Carbon Nanostructures and Microdimensional Nickel / A. Shchegolkov, **N. Voronin**, Y. Rodionov, N. Zemtsova, A. Shchegolkov and I. Filatov // 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). – Lipetsk, Russian Federation. – 2022. – P. 117 – 121. – DOI: 10.1109/SUMMA57301.2022.9974122

3. Study of Magneto-Thermal Surface Reinforcement of Polymeric Materials / Yu. V. Rodionov, D. V. Nikitin, **N. V. Voronin**, I. S. Filatov // Chemical and Petroleum Engineering. – 2021. – № 7-8. – P. 595 – 600.

*В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:*

4. Упрочнение металлизацией полимерных деталей машин и механизмов АПК, полученных посредством аддитивных технологий / **Н. В. Воронин**, А. И. Скоморохова, И. С. Филатов, Ю. В. Родионов, Д. В. Никитин // Наука в центральной России. – 2022. – № 2(56). – С. 125 – 134.



5. Анализ расчета привода комбинированной конструкции одноступенчатого жидкостнокольцевого вакуумного насоса / Д. В. Никитин, Ю. В. Родионов, Г. В. Рыбин, **Н. В. Воронин**, П. А. Галкин, О. О. Иванов // Наука в центральной России. – 2022. – № 2(56). – С. 60 – 69.

6. Кавитационные разрушения в жидкостнокольцевых вакуум-насосах / Д. В. Никитин, Ю. В. Родионов, Г. В. Рыбин, **Н. В. Воронин**, А. И. Скоморохова, А. О. Сухова // Наука в центральной России. – 2022. – № 4(58). – С. 131 – 139.

7. Влияние технологических параметров на процесс внедрения ферромагнитных материалов в поверхность термопластичных и термореактивных полимеров / **Н. В. Воронин**, И. С. Филатов, Ю. В. Родионов, Д. В. Никитин, Махмуд М. А. С. // Наука в центральной России. – 2021. – № 4(52). – С. 115 – 123.

8. Теоретические исследования контактных и изгибных напряжений лопаток рабочего колеса и корпуса жидкостнокольцевого вакуумного насоса из полимеров / **Н. В. Воронин**, Ю. В. Родионов, А. И. Скоморохова, Д. В. Никитин, П. А. Галкин, И. С. Филатов // Наука в центральной России. – 2020. – № 3(45). – С. 85 – 97.

9. Загрязняемость внутренних поверхностей емкостей сельскохозяйственных назначений / С. А. Анохин, **Н. В. Воронин**, А. А. Гуськов, Д. В. Никитин, Ю. В. Родионов, И. С. Филатов // Наука в центральной России. – 2020. – № 1(43). – С. 60 – 69.

*Статьи в сборниках материалов научных конференций:*

10. **Воронин, Н. В.** Оценка экономической эффективности технологии поверхностного армирования изделий агропромышленного комплекса из полимерных материалов / Н. В. Воронин, И. С. Филатов, Ю. В. Родионов // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф., посвященной памяти академика РААСН Чернышова Е. М. – 2022. – С. 362 – 365.

11. Технология поверхностного армирования полимеров для машин и оборудования агропромышленного комплекса / **Н. В. Воронин**, Ю. В. Родионов, Д. В. Никитин, И. С. Филатов // XI Национальная науч.-техн. конф. : сб. науч. тр. – М. : Союз машиностроителей России. – 2022. – С. 62 – 65.

12. **Воронин, Н. В.** Перспективы доработки деталей машин из термопластичных полимеров / Н. В. Воронин, И. С. Филатов, Ю. В. Родионов // Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения : сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практ. конф., посвященной Году науки и технологий. – СПб., 2021. – С. 165 – 168.

13. Современное состояние использования и производства деталей и узлов из полимеров для техники агропромышленного комплекса / **Н. В. Воронин**, Ю. В. Родионов, И. С. Филатов, Д. В. Никитин // Цифровизация агропромышленного комплекса : сб. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. В 2-х т. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2020. – Т. 2. – С. 29 – 34.

14. **Воронин, Н. В.** Способы упрочнения полимерных материалов: современное состояние и перспективы / Н. В. Воронин, Г. В. Рыбин // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития : сб. науч. ст. молодых ученых, аспирантов и студентов ; Тамбовский государственный технический университет. – Тамбов, 2019. – Вып. XI. – С. 48 – 51.

*Прочие издания:*

15. **Воронин, Н. В.** Перспективы металлизации изделий агропромышленного комплекса из реактопластов в процессе формования / Н. В. Воронин, И. С. Филатов, Ю. В. Родионов // Инновационная техника и технология. – 2022. – Т. 9, № 3. – С. 42 – 47.

16. Разработка установки для магнито-термического армирования полимерных деталей сельскохозяйственных машин / **Н. В. Воронин**, И. С. Филатов, Ю. В. Родионов, Д. В. Никитин // Инновационная техника и технология. – 2021. – Т. 8, № 3. – С. 32 – 37.

17. Разработка установки для армирования полимерных сельскохозяйственных деталей / **Н. В. Воронин**, И. С. Филатов, Ю. В. Родионов, Д. В. Никитин // Наука и Образование. – 2021. – Т. 4, № 3. – Текст: электронный. – URL : <http://opusmgau.ru/index.php/see/article/view/3994/3976>

18. Развитие и модификация магнито-термического метода упрочнения деталей машин из термопластичных полимеров / **Н. В. Воронин**, И. С. Филатов, Ю. В. Родионов, А. В. Щегольков // Наука и Образование. – 2021. – Т. 4, № 2. – Текст: электронный. – URL : <http://opusmgau.ru/index.php/see/article/view/3224/3217>

19. Определение сил воздействия на ферромагнитную частицу в процессе магнито-термического поверхностного армирования изделий из термопластичных полимеров / **Н. В. Воронин**, Ю. В. Родионов, Д. В. Никитин, И. С. Филатов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2021. – Т. 27, № 3. – С. 486 – 496.

#### *Патенты на изобретение и полезные модели РФ:*

20. Пат. 2761191 С1 Российская Федерация, МПК C23C 26/00, C23C 24/08, C23C 14/35. Способ поверхностного упрочнения детали из полимерного материала / Филатов И. С., **Воронин Н. В.**, Родионов Ю. В., Никитин Д. В., Рыбин Г. В., Щегольков А. В. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ТГТУ. – № 2021106201 ; заявл. 11.03.2021 ; опубл. 06.12.2021, Бюл. № 34.

21. Пат. 2795315 С1 Российская Федерация, МПК C08J 5/04, C23C 24/00, B29C 43/02. Способ поверхностного упрочнения деталей из полимерного термореактивного материала / Филатов И. С., Родионов Ю. В., Никитин Д. В., **Воронин Н. В.**, Рыбин Г. В. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ТГТУ. – № 2022119093 ; заявл. 13.07.2022 ; опубл. 02.05.2023, Бюл. № 13.

22. Пат. 215192 U1 Российская Федерация, (51) МПК F04C 7/00, F04C 19/00; СПК F04C 7/00, F04C 19/001. Жидкостно-кольцевая машина / Зорин А. С., Родионов Ю. В., Никитин Д. В., Филатов И. С., **Воронин Н. В.** ; заявитель и патентообладатель ООО «ТЕХЛАЙН» (RU). – № 2022111421 ; заявл. 26.04.2022 ; опубл. 02.12.2022, Бюл. № 34.

#### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ЖВН – жидкостнокольцевой вакуумный насос;

АПК – агропромышленный комплекс;

$T$  – температура, К;

$\Delta T$  – разность температур между средами, К;

$t$  – время, с;

$r_{np}$  – приведенный радиус кривизны эвольвентного профиля зацепления рабочего колеса и лопаток корпуса вакуумного насоса, мм;

$H$  – напряженность магнитного поля, А/м;

$\omega$  – число витков катушки;

$I$  – сила тока, А.

---

---

Подписано в печать 02.08.2023.  
Формат 60 × 84 / 16. 0,93 усл.-печ. л.  
Тираж 100 экз. Заказ № 19

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14.  
Телефон (4752) 63-81-08.  
E-mail: izdatelstvo@tstu.ru

Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
392008, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112А.  
E-mail: tipo\_tstu68@mail.ru