

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
№ 4 (16), 2022**

Online ISSN 2687-0029

Тверь 2022

Учредитель: ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Главный редактор: Болотов А.Н., д.т.н., профессор ТвГТУ

Заместители главного редактора:

Измайлов В.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Яблонев А.Л., д.т.н., доцент ТвГТУ

Семенов Н.А., д.т.н., профессор ТвГТУ

Ответственный секретарь: Афанасьева Л.Е., к.ф.-м.н., доцент ТвГТУ

Члены редакционной коллегии:

По направлению «Машиностроение и машиноведение»

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

Горохов Д.Б., д.т.н., доцент БрГУ

Горячева И.Г., академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, ИПМех РАН

Иванов А.С., д.т.н., профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана

Козырева Л.В., д.т.н., доцент ТвГТУ

Матлин М.М., д.т.н., профессор, ВолгГТУ

Мигранов М.Ш., д.т.н., профессор МГТУ «СТАНКИН»

Солдатенков И.А., д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ИПМех РАН

Хопин П.Н., д.т.н., профессор МАИ

Шоркин В.С., д.ф.-м.н., профессор ОГУ имени И.С. Тургенева

По направлению «Транспортное, горное и строительное машиностроение»

Березовский Н.И., д.т.н., профессор БНТУ, Республика Беларусь

Валиев Н.Г., д.т.н., профессор УГГУ

Головин К.А., д.т.н., профессор ТулГУ

Горлов И.В., д.т.н., доцент ТвГТУ

Кантович Л.И., д.т.н., профессор НИТУ «МИСиС»

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

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

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

По направлению «Информатика, вычислительная техника и управление»

Бурдо Г.Б., д.т.н., профессор ТвГТУ

Голенков В.В., д.т.н., профессор БГУИР, Республика Беларусь

Мешалкин В.П., академик РАН, д.т.н., РХТУ им. Д.И. Менделеева

Палюх Б.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Шпрехер Д.М., д.т.н., профессор ТулГУ

Язенин А.В., д.ф.-м.н., профессор ТвГУ

Адрес редакции: 170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22.

E-mail: vestnik_tstu_tekh@mail.ru

Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки» публикует научные статьи и краткие обзоры по разделам «Машиностроение и машиноведение», «Транспортное, горное и строительное машиностроение», «Информатика, вычислительная техника и управление». Журнал выходит 4 раза в год.

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер: ЭЛ № ФС77-74961 от 25 января 2019 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.

© ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В.</i> О прогнозировании ресурса узлов трения по критерию допустимого износа	5
<i>Митюрев А.А.</i> Исследование характеристик галлийсодержащих материалов для скользящих электрических контактов с промежуточной жидкометаллической средой.....	17

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Купорова А.В.</i> Процессы структурообразования в технологии добычи кускового торфа.....	25
<i>Фомин К.В.</i> Оценка прочности режущих элементов на основе анализа их напряженно-деформированного состояния (на примере машины для добычи кускового торфа МТК-16).....	35
<i>Кондратьев А.В., Кочканян С.М., Лысенко Т.И., Гусаров А.А.</i> К вопросу распределения и просеивания гравия по поверхности желобообразного валкового сита.....	46

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>Яконовская Т.Б.</i> Использование доступных информационных инструментов в геологическом анализе	54
<i>Фам К.Б., Мурашев П.М., Богатиков В.Н.</i> Прогнозирующее управление индексом качества процесса сушки зеленого чая.....	63
<i>Кайченев А.В., Ереценко В.В., Яценко В.В., Благовещенский И.Г.</i> Математическое моделирование тепловых и влажностных процессов в камере обезвоживания пищевых продуктов	76

МАТЕРИАЛЫ НАУЧНОГО СЕМИНАРА «ЗОЛотовские ЧТЕНИЯ»

<i>Цурков М.Л., Лопин Г.А.</i> Научная школа академика Е.В. Золотова в ЦНИИ ВКС Минобороны России: этапы создания, достижения	88
<i>Палюх Б.В., Ветров А.Н.</i> Эволюционное управление многостадийными непрерывными технологическими процессами.....	97
<i>Егужоков Р.А., Хмаров И.М., Шевченко Л.Ф., Мешков В.В., Маркушин Г.Н.</i> Оценка дальности действия лазерных дальномеров в составе оптико-электронных систем при локации воздушных объектов.....	107
<i>Федосов О.Ю., Федосов Ю.А.</i> Моделирование высокоскоростного воздействия осколков на систему разнесенных преград.....	117

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

<i>Izmailov V.V., Afanasieva L.E., Novoselova M.V.</i> On forecasting the life of friction units according to the criterion of approved wear.....	5
<i>Mityurev A.A.</i> Study of characteristics of gallium-containing materials for sliding electrical contacts with intermediate liquid metallic medium.....	17

TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION MACHINERY

<i>Kuporova A.V.</i> Structuring processes in lump peat production technology.....	25
<i>Fomin K.V.</i> Estimation of the strength of cutting elements based on the analysis of their stress-strain state (using the example of a machine for mining lump peat MTK-16).....	35
<i>Kondratyev A.V., Kochkanyan S.M., Lysenko T.I., Gusarov A.A.</i> To the question of the distribution and screening of gravel on the surface of a through roll sieve.....	46

INFORMATICS, COMPUTER FACILITIES AND MANAGEMENT

<i>Yakonovskaya T.B.</i> Use of available information tools in geological analysis.....	54
<i>Fam K.B., Murashev P.M., Bogatkov V.N.</i> Predictive control of the quality index of the green tea drying process.....	63
<i>Kaychenov A.V., Ereshchenko V.V., Yatsenko V.V., Blagoveshchensky I.G.</i> Mathematical modeling of thermal and humidity processes in the food drying chamber.....	76

MATERIALS OF THE SCIENTIFIC SEMINAR «ZOLOTOV READINGS»

<i>Tsurkov M.L., Lopin G.A.</i> Scientific school of academician E.V. Zolotov at the Central Research Institute of the Aerospace Forces of the Ministry of Defense of Russia: stages of creation, achievements.....	88
<i>Palyukh B.V., Vetrov A.N.</i> Management of multistage manufacturing based on evidence theory and methods of interval analysis.....	97
<i>Eguzhokov R.A., Khmarov I.M., Shevchenko L.F., Meshkov V.V., Markushin G.N.</i> Evaluation of the range of laser range finders as a part of opto-electronic systems in location of aerial objects.....	107
<i>Fedosov O.Yu., Fedosov Yu.A.</i> Of high-speed impact of fragments on a system modeling of spaced barriers.....	117

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 620.178.1

О ПРОГНОЗИРОВАНИИ РЕСУРСА УЗЛОВ ТРЕНИЯ ПО КРИТЕРИЮ ДОПУСТИМОГО ИЗНОСА

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук,
М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

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

© Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., 2022

Настоящей статьей заканчивается серия публикаций результатов авторских исследований, посвященных прогнозированию износа деталей с градиентом твердости по глубине материала, возникшим в результате механической обработки или применения упрочняющих технологий. Для описания изменения твердости материала в зависимости от расстояния до поверхности трения получена более универсальная аналитическая зависимость, чем в предыдущих работах авторов. Предложенные ранее формулы являются частными случаями этой более общей зависимости. На основании аналитической зависимости, описывающей изменение твердости по глубине материала, известное в трибологии уравнение Дж. Арчарда для оценки величины износа распространено на случай изнашивания поверхности с градиентом твердости по глубине. Кроме того, получена формула для прогнозирования ресурса фрикционного соединения по критерию допустимого износа. Приведен конкретный пример оценки ресурса в виде значения пути трения, на котором достигается предельная величина линейного износа. Показано, что игнорирование градиента твердости при оценке ресурса трибосопряжения может привести к существенной погрешности.

Ключевые слова: трение, изнашивание, упрочнение поверхности, градиент твердости, ресурс, прогнозирование.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-4-5-17

ВВЕДЕНИЕ

Прогнозирование ресурса на стадии проектирования, а также оценка остаточного ресурса на стадии эксплуатации – необходимые элементы обеспечения надежности любого технического устройства. Одним из критериев исчерпания ресурса технического изделия или отдельного узла служит величина предельного износа. Последний рассматривается как индикатор предельного состояния объекта [1, 2]. В связи с этим возникает необходимость разработки методики расчета характеристик изнашивания данного конкретного устройства на основе соответствующих аналитических зависимостей, описывающих процесс изнашивания и его результат. Для фрикционных соединений, являющихся составной частью большинства современных машин, механизмов и приборов, это означает наличие аналитических зависимостей для расчета таких характеристик, как интенсивность или скорость изнашивания, в функции ключевых параметров данного соединения и условий его эксплуатации.

Разработка указанных зависимостей осложняется случайным характером процесса изнашивания, который определяется достаточно большим числом

трудноконтролируемых параметров (до нескольких десятков [3]). Учесть их все в единой модели процесса изнашивания и описать универсальной аналитической зависимостью практически невозможно. Авторы обзора [4], проанализировав сотни имеющихся в трибологической литературе соответствующих аналитических зависимостей, пришли к выводу, что не существует универсальных и пригодных для практического применения уравнений, позволяющих предсказать результат процесса изнашивания. С момента публикации этой работы ситуация не изменилась.

УРАВНЕНИЕ АРЧАРДА КАК ИНСТРУМЕНТ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТА ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ

К числу наиболее известных и часто используемых аналитических зависимостей, позволяющих прогнозировать величину износа трущихся поверхностей, относится уравнение Арчарда (или Хольма – Арчарда) [3, 5–8], которое обычно записывают в виде

$$I_V = K \frac{N}{H} \quad (1)$$

или в виде

$$I_h = K \frac{p_n}{H}, \quad (2)$$

где $I_V = \frac{V}{L}$ и $I_h = \frac{h}{L}$ – объемная и линейная интенсивности изнашивания; V и h – объем и толщина слоя изношенного материала; L – путь трения; N – нормальная нагрузка на контакт; H – твердость поверхностных слоев материала трущихся деталей; K – эмпирический коэффициент, обычно называемый коэффициентом изнашивания; p_n – номинальное контактное давление.

Несмотря на простой вид, уравнения (1) и (2) отражают основные тенденции, установленные в ходе многочисленных экспериментов:

более твердая поверхность трущихся деталей изнашивается меньше, чем менее твердая [9];

износ пропорционален пути трения [5] (прямая пропорциональность не единственный возможный вариант);

с ростом нормальной нагрузки износ трущихся деталей увеличивается [5].

Приведенные утверждения – это именно тенденции, и уравнения (1) и (2) описывают их весьма приблизительно, только при неизменном в процессе эксплуатации механизме изнашивания и в определенном диапазоне изменения параметров, входящих в эти уравнения. Эксперименты показывают, что зависимости интенсивности изнашивания от параметров, входящих в уравнения (1) и (2), часто нелинейные и носят степенной характер. Тем не менее уравнение (1) не потеряло своей актуальности [10].

Здесь уместно провести аналогию с известным законом трения Амонтона

$$F_{\text{тр}} = fN,$$

где $F_{\text{тр}}$ и N – силы трения и нормального давления соответственно; f – коэффициент трения.

Как и уравнение Арчарда, закон Амонтона очень приближителен (хотя бы вследствие непостоянства коэффициента трения). Тем не менее он широко используется в конструктивных расчетах различных технических устройств [11]. Как и значения коэффициента изнашивания K , значения коэффициента трения f определяются экспериментально или принимаются на основании справочных данных в зависимости от материала трущихся деталей и условий трения.

Уравнения (1) и (2) имеют в основном эмпирическую (или полуэмпирическую) природу. Тем не менее в обоснование их можно привести аргументы фундаментального физического характера [5, 6]:

1. Очевидно, что объем изношенного материала есть результат процессов разрушения поверхностных слоев трущихся тел, что требует определенных затрат энергии. В связи с этим логично предположить, что изношенный объем пропорционален работе сил трения $V \propto F_{\text{тр}}L = fNL$. Отсюда вытекает пропорциональность объемной интенсивности изнашивания величине нормальной нагрузки (см. уравнение (1)).

2. Твердость в уравнениях (1) и (2) выступает, прежде всего, в качестве верхней оценки величины фактического контактного давления p_r . При пластической деформации неровностей шероховатости контактирующих поверхностей $p_r = H$, при упругой деформации p_r меньше величины H и стремится к последней с ростом нагрузки. Если предположить, что образование частиц износа происходит на площадках фактического контакта неровностей шероховатости трущихся поверхностей, то можно считать объем изношенного материала пропорциональным фактической площади контакта $A_r = \frac{N}{p_r}$, из чего следует, что $V \propto \frac{N}{p_r}$. Заменяя величину p_r ее верхней оценкой H , получаем фактически уравнение (1). Кроме того, твердость характеризует прочностные свойства материала трущихся деталей (такие, например, как предел текучести и предел прочности).

В последнее время для обоснования уравнения Арчарда привлекаются современные методы исследования. Например, в обзорной работе [12] описаны результаты численного моделирования процесса формирования частиц износа при адгезионном изнашивании. На основе модельного потенциала парного взаимодействия атомов и модели контактного взаимодействия неровностей шероховатости дается обоснование физического смысла коэффициента изнашивания K в уравнении Арчарда. Численное моделирование для объяснения механизма образования частиц износа при адгезионном изнашивании используют также авторы работы [13]. Они приходят к выводу, к которому многие авторы приходили и ранее: линейная зависимость интенсивности изнашивания от нагрузки является частным случаем более общей степенной зависимости с показателем степени, большим единицы.

Наконец, уравнение (1) можно обосновать простым анализом размерностей [5]. Объемная интенсивность изнашивания I_V имеет размерность площади (т.е. квадрата длины), такую же размерность имеет отношение N/H . При пластическом контакте это отношение буквально соответствует площади фактического контакта. Тогда безразмерный коэффициент K выражает соотношение указанных площадей (или, иными словами, вероятность образования частиц износа).

Многие приводимые в литературе более сложные аналитические зависимости для прогнозирования результатов изнашивания также можно представить в виде выражения (1). Например, для расчета интенсивности усталостного изнашивания известна формула [7, 14]

$$I_h = \frac{k_y}{n_{ц}} \sqrt{\frac{\delta}{r}} \cdot \frac{p_n}{p_r}, \quad (3)$$

где k_y – коэффициент порядка 0,1, характеризующий распределение неровностей шероховатости по высоте; $n_{ц}$ – число циклов нагружения, приводящее к усталостному разрушению материала контактирующих деталей; δ – контактная деформация (сближение контактирующих поверхностей); r – средний радиус кривизны вершин выступов шероховатости.

Для стационарного процесса изнашивания величины k_y и $\sqrt{\frac{\delta}{r}}$ можно считать постоянными, характерными для данной фрикционной пары в данных условиях эксплуатации. Тогда, обозначая $\frac{k_y}{n_{ц}} \sqrt{\frac{\delta}{r}} = K$ и принимая $p_r = H$, приводим уравнение (3) к виду (2). Аналогично, как показал автор работы [15], можно привести к виду (1) уравнения, описывающие все наиболее распространенные виды изнашивания.

На основании вышеизложенного мы полагаем, что уравнение Арчарда, несмотря на хорошо известные недостатки, может служить аналитической основой для прогнозирования ресурса фрикционного соединения. Специфику преобладающего в данной фрикционной паре механизма изнашивания отражает коэффициент изнашивания K . Исчерпывающие рекомендации по его экспериментальному определению даны в работе [2], а ориентировочные значения легко найти в литературе, например в книгах [5, 16], где коэффициент K приводится как функция материала трущихся деталей, или в статье [17], где он приводится как функция условий трения.

Используя уравнения (1) или (2) для прогнозирования величины износа (при заданной длительности эксплуатации) или ресурса (при заданной величине допустимого износа), необходимо учитывать важное обстоятельство. В настоящее время практически во всех фрикционных соединениях рабочие поверхности подвергаются упрочняющей обработке: химико-термической, обработке концентрированным потоком энергии, нанесению износостойких покрытий. В результате в материале деталей фрикционной пары возникает градиент твердости по координате, направленной от рабочей поверхности вглубь материала детали (для краткости – по глубине), и этот градиент не учитывается в уравнениях (1) и (2). И даже если специальная упрочняющая технология не применяется, поверхностные слои материала упрочняются в результате технологической обработки детали. Но возможен и прямо противоположный эффект: разупрочнение поверхностей, т.е. возрастание твердости с глубиной. Положительный градиент твердости может быть результатом проявления так называемого эффекта Ребиндера (эффекта адсорбционного снижения прочности).

Цель данной работы – распространить уравнения (1) и (2) на случай изнашивания деталей с градиентом твердости по глубине, возникшим в результате механической обработки детали или в результате применения специальной упрочняющей обработки.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ПО ГЛУБИНЕ МАТЕРИАЛА И ИХ АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Типичный вид зависимостей твердости материала деталей фрикционных соединений от глубины (расстояния от рабочей поверхности) приведен на рис. 1. Зависимости на рис. 1а в основном характерны деталям после механической обработки. При этом поверхностные слои, как отмечалось выше, могут быть не только более твердые, чем материал в объеме (линия 1), но и менее твердые (линия 2). Для поверхностей с гальваническим покрытием или покрытием, нанесенным иным способом, характерны зависимости, приведенные на рис. 1б. Наличие переходной зоны 2 может быть обусловлено взаимной диффузией материалов покрытия и подложки. Аналогичные зависимости могут наблюдаться для поверхностей после лазерной или электронно-лучевой обработки. Некоторые примеры, подтверждающие сказанное, приведены на рис. 2.

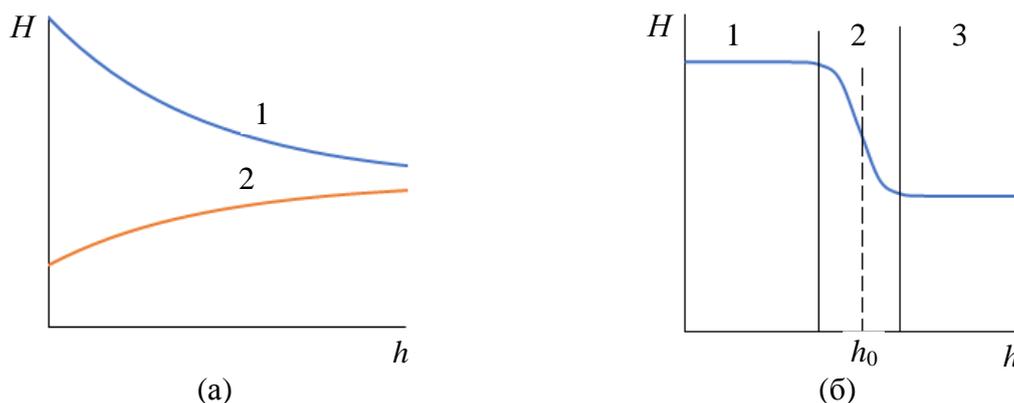


Рис. 1. Зависимость твердости материала детали H от глубины h при различных технологиях обработки поверхности: монотонная (линия 1 – упрочнение; 2 – разупрочнение поверхностных слоев) (а); немонотонная (зона 1 – упрочняющее покрытие; 2 – переходная зона; 3 – неупрочненный материал) (б)

Для зависимостей, характер которых соответствует рис. 1а, в работе [18] предложено описывающее их аналитическое выражение вида

$$H = H_0 + H_m \exp\left(-\frac{h}{h_m}\right), \quad (4)$$

где H_0 – твердость материала в объеме (на большом расстоянии от поверхности); h – глубина слоя материала (расстояние от поверхности); H_m и h_m – эмпирические константы; $H_0 + H_m$ – твердость при $h = 0$; h_m характеризует быстроту изменения твердости с глубиной.

Для зависимостей вида 1 (см. рис. 1а) $H_m > 0$, для зависимостей вида 2 (см. рис. 1а) $H_m < 0$. Сплошные линии на рис. 2а–в, построенные по уравнению (4), хорошо описывают экспериментальные данные. Об этом свидетельствует коэффициент детерминации R^2 , величина которого для этих зависимостей составляет не менее 0,91.

Зависимости, характер которых соответствует рис. 1б, предлагается описывать аналитическим выражением вида

$$H = H_0 + \frac{H_m}{1 + \exp\left(\frac{h-h_0}{h_m}\right)}, \quad (5)$$

где H_0 – твердость материала в объеме; h – глубина слоя материала; H_m , h_m и h_0 – эмпирические константы.

Новая константа h_0 соответствует условной границе между зонами 1 и 3 (см. рис. 1б), величины H_m и h_m аналогичны соответствующим константам в уравнении (4), причем величина h_m может быть рассчитана по приближенной формуле

$$h_m \approx \frac{H_m}{4} \cdot \left(\frac{\Delta H}{\Delta h}\right)^{-1},$$

где $\frac{\Delta H}{\Delta h}$ – наклон кривой $H(h)$ в точке $h = h_0$.

Уравнение (5) также применимо при обратном соотношении твердостей, когда поверхностный слой менее твердый, чем материал в объеме. В этом случае $H_m < 0$. На рис. 2г–е сплошные линии построены по уравнению (5). Они также хорошо описывают экспериментальные данные. Соответствующие величины коэффициента детерминации R^2 – не менее 0,93. Очевидно, что уравнение (4) является частным случаем уравнения (5) при $h_0 = 0$ и $\exp\left(\frac{h}{h_m}\right) \gg 1$.

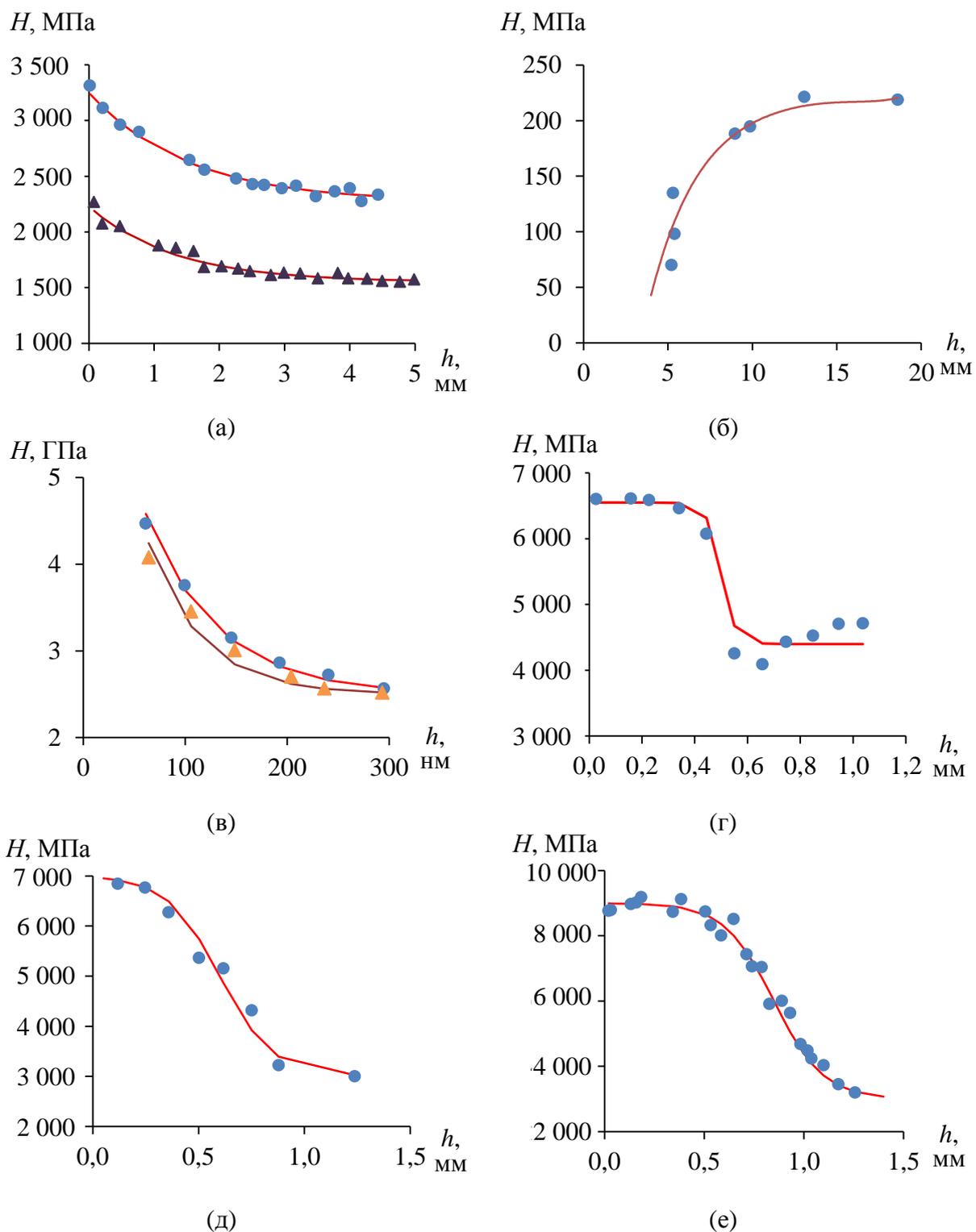


Рис. 2. Изменение твердости по глубине в зависимости от материала и технологии обработки поверхности: обкатка роликом (верхняя кривая – сталь 45Г2, нижняя – сталь 20) [19] (а); микротвердость, Cd [20] (б); нанотвердость, Ni, полировка (верхняя кривая – размер абразивного зерна 0,05 мкм, нижняя – 5 мкм) [21] (в); микротвердость, сталь 30ХГСА, лазерная закалка [22] (г); твердость по Кнупу, чугун, лазерное упрочнение [23] (д); твердость по Виккерсу, сталь 45, электронно-лучевая обработка [23] (е); точки – экспериментальные значения; линии – теоретические зависимости (см. уравнения (4) и (5))

Типичные значения толщины упрочненного слоя для поверхностей деталей из различных материалов после механической, в том числе упрочняющей, технологии приведены в таблице. Важно отметить, что они сопоставимы с величиной допустимого износа, который, по литературным данным, может иметь порядок от десятков микрометров до десятых долей миллиметра и даже до миллиметра [24–27]. Таким образом, при оценке ресурса фрикционного соединения необходимо учитывать изменение твердости в зависимости от расстояния до поверхности детали. Подобный подход обсуждается в работе [8], где для описания зависимости твердости материала от глубины используется многочленное выражение.

Типичные значения толщины упрочненного слоя
в зависимости от технологии обработки [16, 28, 29]

Технология упрочняющей обработки		Характерная толщина упрочненного слоя
Лазерная или электронно-лучевая		0,2–1 мм
Вакуумное напыление	Физическое (PVD)	1–10 мкм
	Химическое (CVD)	1–20 мкм
Ионная имплантация		0,02–0,5 мкм
Гальваническое покрытие		10 мкм – 2 мм
Термическое напыление		0,1–5 мм
Химико-термическая обработка	Цементация	0,2–2 мм
	Цианирование	0,15–1,5 мм
	Борирование	0,02–0,2 мм
	Азотирование	0,01–0,5 мм
Механическая обработка	Точение	0,03–0,2 мм
	Фрезерование	0,04–0,2 мм
	Шлифование	0,03–0,06 мм
	Поверхностное пластическое деформирование	1–20 мм

Применение выражения (5) для описания процесса изнашивания и прогнозирования ресурса фрикционного соединения показано в следующем разделе статьи.

ЗАВИСИМОСТЬ ВЕЛИЧИНЫ ЛИНЕЙНОГО ИЗНОСА ОТ ПУТИ ТРЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА ФРИКЦИОННОГО СОЕДИНЕНИЯ

Для малого промежутка времени на основании уравнения (2) можно записать:

$$\frac{dh}{vdt} = K \frac{p_n}{H(h)},$$

где v – скорость относительного движения контактирующих поверхностей.

Подставляя в это уравнение зависимость $H(h)$ по формуле (5), получаем дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными

$$\left[H_0 + \frac{H_m}{1 + \exp\left(\frac{h-h_0}{h_m}\right)} \right] dh = K p_n v dt.$$

Интегрируя с учетом начального условия $h = 0$ при $t = 0$, после преобразований имеем

$$(H_0 + H_m)h + H_m h_m \ln \frac{1 + \exp\left(-\frac{h_0}{h_m}\right)}{1 + \exp\left(\frac{h-h_0}{h_m}\right)} = K p_n L, \quad (6)$$

где $L = vt$ – путь трения.

Введя обозначение $\psi = \frac{H_0 + H_m}{H_0}$ (степень упрочнения), уравнение (6) можем записать в виде

$$\psi h + (\psi - 1)h_m \ln \frac{1 + \exp\left(-\frac{h_0}{h_m}\right)}{1 + \exp\left(\frac{h-h_0}{h_m}\right)} = K \left(\frac{p_n}{H_0}\right) L. \quad (7)$$

На рис. 3 показана зависимость (7). Видно, что скорость изнашивания меняется при $h = h_0$: 1) скачком при малых значениях h_m ; 2) постепенно при достаточно больших.

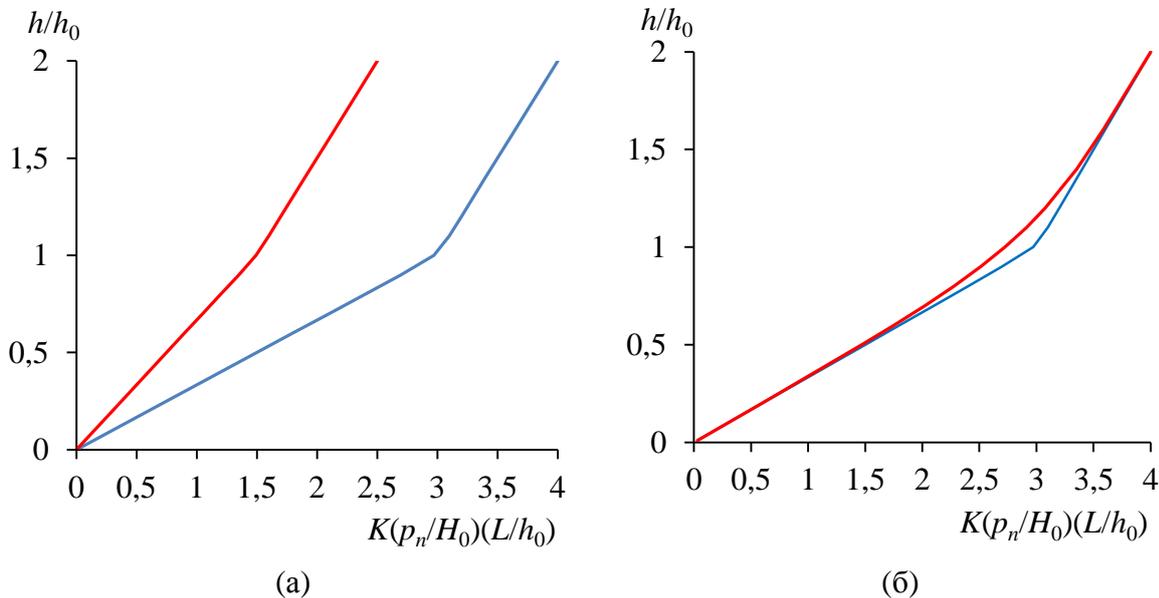


Рис. 3. Зависимость относительной величины линейного износа от безразмерного пути трения: влияние степени упрочнения ψ (верхняя кривая для $\psi = 3$, нижняя – $\psi = 1,5$) (а); влияние параметра h_m (верхняя кривая для $h_m/h_0 = 0,2$, нижняя – $h_m/h_0 = 0,02$) (б)

Принимая в качестве критерия наступления предельного состояния достижение допустимого износа $h_{\text{пред}}$, из уравнения (7) получаем формулу для прогнозирования ресурса фрикционного узла в виде предельного пути трения

$$L_{\text{пред}} = \left(\frac{H_0}{K p_n}\right) \left[\psi h_{\text{пред}} + (\psi - 1)h_m \ln \frac{1 + \exp\left(-\frac{h_0}{h_m}\right)}{1 + \exp\left(\frac{h_{\text{пред}} - h_0}{h_m}\right)} \right]. \quad (8)$$

Как видно из уравнения (8) и рис. 3, повысить ресурс фрикционного соединения можно повышением степени упрочнения ψ и толщины покрытия h_0 . При этом, варьируя соотношение этих факторов, можно выбрать их оптимальное сочетание, что показано на рис. 4 [30]. Видно, что менее износостойкое (менее твердое) покрытие может обеспечить больший ресурс, чем существенно более износостойкое (более твердое) покрытие меньшей толщины.

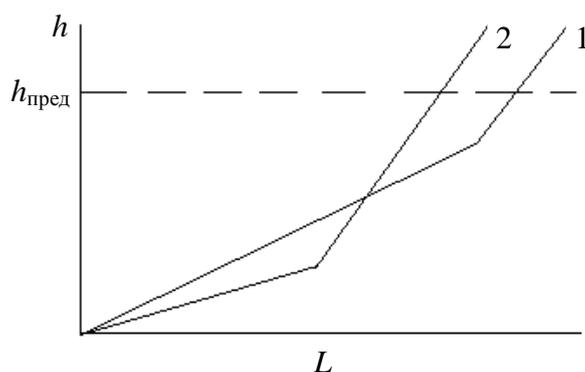


Рис. 4. Изнашивание упрочненных деталей:
 1 – менее твердое, но более толстое покрытие; 2 – более твердое, но менее толстое покрытие; $h_{\text{пред}}$ – предельная величина линейного износа

Рассмотрим расчет ресурса пары трения на примере режущего инструмента (сверла) из быстрорежущей стали Р6М5 после лазерной обработки [31]. Изнашивание опытных образцов проводилось в натуральных испытаниях при сверлении отверстий в пластине из стали 12Х18Н10Т сверлами из стали Р6М5 после лазерной обработки. Критерием предельного состояния служила величина предельного износа 0,1 мм или поломка сверла [31].

На рис. 5 приведена зависимость микротвердости стали Р6М5 от глубины после лазерного воздействия мощностью 40 Вт. Как видно из рис. 5, глубина зоны термического воздействия составляет порядка 60 мкм, что сравнимо с величиной предельного износа. Формула (5) хорошо описывает изменение микротвердости по глубине при следующих параметрах в формуле (5): $H_0 = 6\,500$ МПа, $H_m = 2\,500$ МПа, $h_0 = 60$ мкм, $h_m = 2,3$ мкм. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,91$.

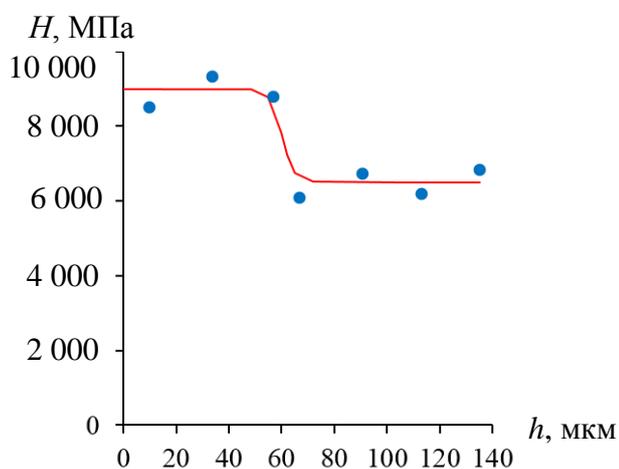


Рис. 5. Изменение микротвердости в поперечном сечении зоны лазерной обработки:
 точки – экспериментальные значения [31]; линия – расчет по формуле (5)

На рис. 6 показан процесс изнашивания исследуемых образцов в относительных координатах. Исчерпанием ресурса считается достижение предельной величины линейного износа (пунктирная линия на рис. 6). Прогнозирование ресурса по формуле Арчарда без учета изменения микротвердости по глубине приводит к относительной погрешности 19 % при использовании в расчете постоянной величины микротвердости $H = H_0$ (твердость неупрочненного материала) и 13 % при использовании постоянной

величины $H = H_0 + H_m$ (максимальная микротвердость). В первом случае прогноз ресурса оказывается заниженным, во втором – завышенным. Величина погрешности зависит от степени упрочнения ψ . Например, при $\psi = 2$ погрешности составят уже 37 и 25 % соответственно. Обратим внимание, что в первом случае прогноз ресурса оказывается заниженным, что плохо с экономической точки зрения (часть ресурса окажется неиспользованной), а во втором случае – завышенным, что плохо с точки зрения надежности (есть вероятность отказа до проведения профилактических мероприятий или окончания эксплуатации).

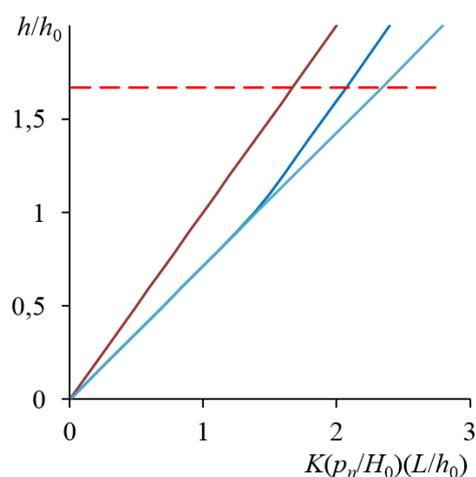


Рис. 6. Зависимость относительной величины линейного износа от безразмерного пути трения. Средняя линия – расчет по формуле (7); левая и правая линии – расчет по формуле Арчарда при $H = H_0$ и $H = H_0 + H_m$ соответственно; пунктирная – предельное значение линейного износа

Необходимо отметить, что при расчетах зависимости величины линейного износа от пути трения, представленной на рис. 6, предполагалось, что коэффициент изнашивания K остается постоянным в процессе изнашивания и не изменяется на границе зоны термического воздействия. Если есть основания считать это предположение справедливым, то из уравнений (6) и (7) можно рассчитать величину коэффициента K по результатам эксперимента для данной фрикционной пары в данных условиях трения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена аналитическая зависимость, позволяющая прогнозировать ресурс фрикционного соединения по критерию допустимого (предельного) износа с учетом влияния упрочняющей обработки на механические свойства материала трущихся деталей. В основу положено известное в трибологии уравнение Арчарда, связывающее интенсивность изнашивания с нагрузкой на фрикционный контакт и твердостью поверхностных слоев материалов компонентов пары трения. Уравнение Арчарда обобщено на случай изнашивания деталей с градиентом твердости по глубине материала, возникшим в результате воздействия упрочняющей технологии. Проанализированы экспериментальные результаты по изменению твердости материала в зависимости от расстояния до рабочей поверхности детали и выделены типичные зависимости, отражающие это изменение. Предложено обобщенное уравнение, описывающее различные варианты указанной зависимости и включающее предложенные ранее аналогичные уравнения как частные случаи.

Параметрами предложенной аналитической зависимости, отражающими изменение механических свойств материала в результате упрочняющего воздействия, являются степень упрочнения, средняя толщина упрочненного слоя и градиент механических свойств (твердости) по глубине материала. На примере упрочняющей обработки в виде лазерного воздействия показано влияние указанных параметров на ресурс конкретного изделия. Показано, что игнорирование градиента твердости при расчете ресурса фрикционного сопряжения может привести к существенной погрешности в оценке величины ресурса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дроздов Ю.Н. Прогнозирование изнашивания с учетом механических, физико-химических и геометрических факторов // Современная трибология: Итоги и перспективы. М.: ЛКИ. 2014. С. 24–32.
2. Горленко О.А., Тихомиров В.П., Бишутин Г.А. Прикладная механика: триботехнические показатели качества машин. М.: Юрайт. 2017. 264 с.
3. ASM Handbook: Friction, lubrication and wear technology / ed. G.E. Totten. ASM International. 1992. V. 18. 942 p.
4. Meng H.C., Ludema K.C. Wear models and predictive equations: their form and content // *Wear*. 1995. V. 183–185. P. 443–457.
5. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. М.: Физматлит. 2007. 368 с.
6. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: Физматлит. 2013. 352 с.
7. Детали машин. Конструкционная прочность. Трение, износ, смазка. Машиностроение. Энциклопедия. М.: Машиностроение. 1995. Т. IV-1. 864 с.
8. Fundamentals of friction and wear on the nanoscale / eds. E. Gnecco, E. Meyer. Springer. 2015. 704 p.
9. Хрущев М.М. Трение, износ и микротвердость материалов: избранные работы (к 120-летию со дня рождения). М.: Красанд. 2012. 512 с.
10. Mukras S.M.S. Computer simulation / Prediction of wear in mechanical components // *Advances in tribology*. V. 2020. 15 p.
11. Иванов А.С. Конструирование машин. Развитие основ. Прочность, жесткость, надежность. СПб.: Политехник. 2021. 238 с.
12. Molinari J.-F., Aghababaei R., Brink T., Frérot L., Milanese E. Adhesive wear mechanisms uncovered by atomistic simulations // *Friction*. 2018. V. 6 (3). P. 245–259.
13. Popov V.L., Pohrt R. Adhesive wear and particle emission: Numerical approach based on asperity-free formulation of Rabinowicz criterion // *Friction*. 2018. V. 6 (3). P. 260–273.
14. Доценко А.И., Буяновский И.А. Основы триботехники: учебник. М.: ИНФРА-М. 2014. 336 с.
15. Stolarsky T.A. Tribology in Machine Design. Oxford e.a.: Butterworth-Heinemann. 1990. 300 p.
16. Williams J. Engineering Tribology. Cambridge e.a.: Cambridge University Press. 2005. 488 p.
17. Rabinowicz E. The wear coefficient – magnitude, scatter, uses // *ASME Trans. Journal of Lubrication Technology*. 1981. V. 103 (2). P. 188–193.
18. Измайлов В.В., Новоселова М.В. О влиянии упрочняющей обработки поверхностей трения на ресурс трибосопряжения // *Вестник Тверского*

государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2022. № 3 (15). С. 5–14.

19. Филяев А.Т. Исследование износостойкости сталей, упрочненных наклепом. Минск: Наука и техника. 1974. 168 с.

20. Кашеев В.Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. М.: Машиностроение. 1978. 213 с.

21. Головин Ю.И. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикроробъектах, тонких приповерхностных слоях и пленках (обзор) // *Физика твердого тела*. 2008. Т. 50. Вып. 12. С. 2113–2142.

22. Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., Барабонова И.А., Раткевич Г.В. Влияние лазерной закалки на микроструктуру и абразивную износостойкость стали 30ХГСА // *Металлы*. 2020. № 1. С. 54–58.

23. ASM Handbook: Heat treating / eds. J. Dossett, G.E. Totten. ASM International. 1991. V. 4. 1012 p.

24. Решиков В.Ф. Трение и износ тяжело нагруженных передач. М.: Машиностроение. 1975. 232 с.

25. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение. 1977. 526 с.

26. Трение, изнашивание и смазка: справочник. М.: Машиностроение. 1978. Кн. 1. 400 с.

27. Погодаев Л.И., Кузьмин В.Н., Дудко П.П. Повышение надежности трибосопряжений. СПб.: Академия транспорта РФ. 2001. 304 с.

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

29. Горленко А.О., Горленко О.А., Проскурин А.С. Триботехнология. М.: Юрайт. 2017. 187 с.

30. Bayer R.G. Engineering design for wear. New York: Marcel Dekker, Inc. 2004. 416 p.

31. Огин П.А., Мерсон Д.Л., Кондрашина Л.А., Васькин К.Я. Влияние режимов лазерной модификации на структуру, свойства и износостойкость мелкогабаритного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 // *Вектор науки ТГУ*. 2015. № 4 (34). С. 83–88.

Для цитирования: Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В. О прогнозировании ресурса узлов трения по критерию допустимого износа // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 4 (16). С. 5–17.

ON FORECASTING THE LIFE OF FRICTION UNITS ACCORDING TO THE CRITERION OF APPROVED WEAR

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., L.E. AFANASIEVA, Cand. Sc.,
M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

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

The article continues the publication of the results of the authors' research on the prediction of wear of parts with a hardness gradient along the depth of the material resulting from machining or the use of hardening techniques. To describe the change in the hardness of a material with distance from the friction surface, a more universal analytical dependence was obtained than in previous works of the authors. The previously proposed formulas are

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 4 (16), 2022*

particular cases of this more general relationship. On the basis of the analytical dependence describing the change in hardness with depth of the material, the J. Archard equation known in tribology for estimating the amount of wear is extended to the case of surface wear with a hardness gradient in depth. A formula was also obtained for predicting the resource of a friction joint according to the criterion of acceptable wear. A specific example of resource estimation in the form of a friction path value, on which the limiting value of linear wear is reached, is given. It is shown that ignoring the hardness gradient when estimating the service life of friction joint can lead to a significant error.

Keywords: friction, wear, surface hardening, hardness gradient, resource, prediction.

Поступила в редакцию/received: 20.06.2022; после рецензирования/revised: 26.08.2022;
принята/accepted: 09.09.2022

УДК 621.891: 621.313.04

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЛЛИЙСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СКОЛЬЗЯЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СРЕДОЙ

А.А. МИТЮРЕВ, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: and.mit@westa69.ru

© Митюрёв А.А., 2022

В статье приведено описание конструкций двух установок, использующихся при исследовании электрических характеристик жидких металлов на основе галлия и его эвтектических сплавов для жидкометаллических контактов электрических машин и аппаратов. Установки позволяют определять удельное электрическое сопротивление жидких металлов независимо от конструкции жидкометаллических узлов без образования интерметаллических соединений с галлием по ГОСТ 8024-90 в диапазоне температур 30...180 °С. Экспериментально подтвержден линейный характер температурной зависимости удельного электрического сопротивления $\rho = f(T)$ галлийсодержащих материалов для жидкометаллических контактов. Для этой температурной зависимости определены значения коэффициента удельного электрического сопротивления жидких металлов при температуре 30 °С и температурный коэффициент электрического сопротивления галлия и его эвтектических сплавов (% по массе) GI (77,5 % Ga, 22,5 % In); GIS (62 % Ga, 25 % In, 13 % Sn); GISZ (64 % Ga, 12 % In, 13 % Sn, 11 % Zn), которые применяются в современных многоамперных электрических аппаратах, в том числе композиционных жидкометаллических контактах.

Ключевые слова: скользящий электрический контакт, жидкометаллический контакт, граничное трение, изнашивание, галлий, эвтектический сплав, удельное электрическое сопротивление, температурная зависимость.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-4-17-24

ВВЕДЕНИЕ

За последние несколько десятилетий мощность электрического оборудования в металлургическом производстве, в частности электролизных установок, выросла более чем в 30 раз (в настоящее время может достигать более 1 000 МВт) с увеличением номинальных токов более чем в 20 раз (в настоящее время – до 150...200 кА). Подобные многоамперные электрические аппараты применяются при производстве алюминия, магния, цинка, кадмия, кобальта и других материалов, незаменимых в современном авиа- и судостроении, космической и оборонных отраслях, а также при образовании многих химических веществ, таких как водород, кислород, хлор, фтор, каустическая сода, электролизным способом. Во многих случаях оптимальным решением технологических проблем, связанных с эксплуатацией многоамперных аппаратов, является использование жидкометаллических контактов (ЖМК), поскольку у них есть очевидные и значительные преимущества по сравнению с традиционными твердометаллическими электрическими контактами [1]. Жидкометаллические контакты обладают очень малым переходным электрическим сопротивлением $R_{пер}$. Существенно, что при определенных материалах и технологиях изготовления ЖМК $R_{пер}$ может стремиться к нулю, поэтому они не подвержены перегреву и последующему свариванию. При этом эксплуатация ЖМК не зависит от контактного нажатия, что позволяет упростить и, соответственно, удешевить конструкции и приводные механизмы электрических аппаратов [1–5]. Особенно перспективным выглядит применение сильноточных композиционных ЖМК, представляющих собой пористый, прочный и износостойкий твердометаллический каркас, пропитанный или смоченный жидким металлом на основе галлия и его эвтектических сплавов [1, 3, 5–7]. Эксплуатация композиционных ЖМК не зависит от их положения в пространстве, поэтому они могут эффективно использоваться в качестве скользящих электрических контактов. При этом отсутствие в подобных ЖМК необходимости в контактном нажатии может предполагать низкие потери энергии на трение при относительном движении контакт-деталей, в том числе при высоких температурах и в вакууме [8–11]. Применение композиционных ЖМК в многоамперных аппаратах позволяет уменьшить контактное нажатие в 6...10 раз по сравнению с необходимым контактным нажатием в устройствах с медными контактами и в 3...6 раз в устройствах с серебряными контактами [3, 5].

Однако производство контактных устройств на основе скользящих ЖМК ограничено из-за практически полного отсутствия исследований трения, изнашивания и электрической проводимости таких контактов при граничном трении (т.е. взаимодействии материала твердометаллического каркаса композиционного ЖМК или твердых контакт-деталей через промежуточную жидкометаллическую (ЖМ) среду), а также отсутствия исследований фрикционных и электрических характеристик самой ЖМ-среды как компонента трибологической системы и их взаимного влияния.

Важной характеристикой промежуточной ЖМ-среды при проектировании ЖМК любого типа является удельное электрическое сопротивление ρ жидких металлов. Анализ данных по измерению ρ и температурного коэффициента электрического сопротивления α ЖМ-материалов на основе жидкого галлия при температуре плавления галлия $T_{пл} = 29,78$ °С приведен в табл. 1 [4, 12].

Таблица 1. Характеристики температурной зависимости электрического сопротивления галлия

Автор	$\rho, 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\alpha, 10^{-5} \text{ град}^{-1}$
C.F. Powell	25,4	75,4
Г.И. Горяга	25,9	87
A. Roll	25,9	481
P.W. Bridgman	25,92	84
L.G. Shulz	25,84	77
N.E. Cusack	25,9	98
Б.Е. Семячкин	25,76	79
С.П. Яценко	25,8	79

Как следует из табл. 1, большинство значений удельного электрического сопротивления ρ жидкого галлия при температуре плавления приближаются к величине $25,8...25,9 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, а температурный коэффициент электрического сопротивления α близок к значению $80 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$.

Современные ЖМК могут работать в широком диапазоне температур до $800 \text{ }^\circ\text{C}$ [9] и использовать, помимо жидкого галлия, его эвтектические сплавы с более низкой температурой плавления от $4 \text{ }^\circ\text{C}$. В работах [4, 5, 12] установлен линейный характер температурной зависимости удельного электрического сопротивления ρ жидкого галлия и его эвтектических сплавов. Диапазоны полученных значений ρ при температурах от 30 до $500 \text{ }^\circ\text{C}$ указаны в табл. 2 [5].

Таблица 2. Температурная зависимость удельного электрического сопротивления галлия и его эвтектических сплавов

Состав сплава (% по массе)	$\rho, 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (при температуре)
Галлий	26,0 ($40 \text{ }^\circ\text{C}$)
Галлий – индий (77,5/22,5)	23,6 ($30 \text{ }^\circ\text{C}$); 32,5 ($500 \text{ }^\circ\text{C}$)
Галлий – индий – серебро (74/24/2)	27,8 ($30 \text{ }^\circ\text{C}$); 40,0 ($500 \text{ }^\circ\text{C}$)
Галлий – индий – олово (62/25/13)	28,2 ($30 \text{ }^\circ\text{C}$); 37,3 ($500 \text{ }^\circ\text{C}$)

Представленные в табл. 2 данные удельного электрического сопротивления определялись на моделях ЖМК и в реальных электрических аппаратах с ЖМК, при этом на регистрируемое значение контактного падения напряжения ΔU могли оказывать влияние применяемые материалы и конструкция ЖМ-узла, а также проводимость соединения (контакта) «жидкий металл – контактная поверхность твердометаллической детали». Таким образом, целью настоящей работы являлось исследование температурной зависимости удельного электрического сопротивления галлийсодержащих материалов, необходимой для расчета эксплуатационных параметров многоамперных электрических аппаратов с ЖМК в условиях, не зависящих от конструкции ЖМК, с использованием в экспериментах материалов, которые не образуют с галлием интерметаллических соединений, способных оказать какое-либо влияние на проводимость промежуточной ЖМ-среды.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования температурной зависимости электрического сопротивления галлийсодержащих материалов были созданы две установки (рис. 1), принцип работы которых основан на регистрации контактного падения напряжения ΔU на вольфрамовых зондах, инертных к воздействию галлия и его эвтектических сплавов, при постоянном токе по четырехпроводной схеме по методу вольтметра – амперметра.

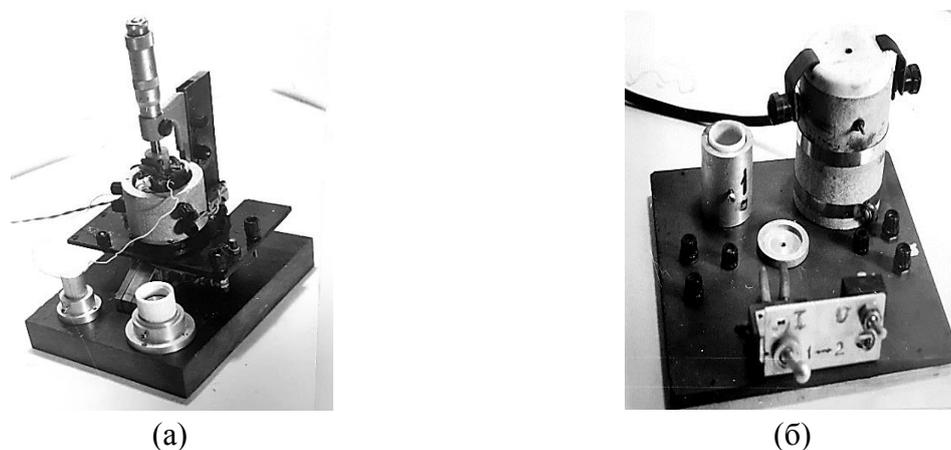


Рис. 1. Внешний вид установок для исследования температурной зависимости электрического сопротивления: УЭС-1 (а); УЭС-2ЛЧ (б)

В установке УЭС-1 (рис. 2) в стеклянной изоляционной трубке формировался ЖМ-проводник с фиксированными длиной и поперечным сечением.

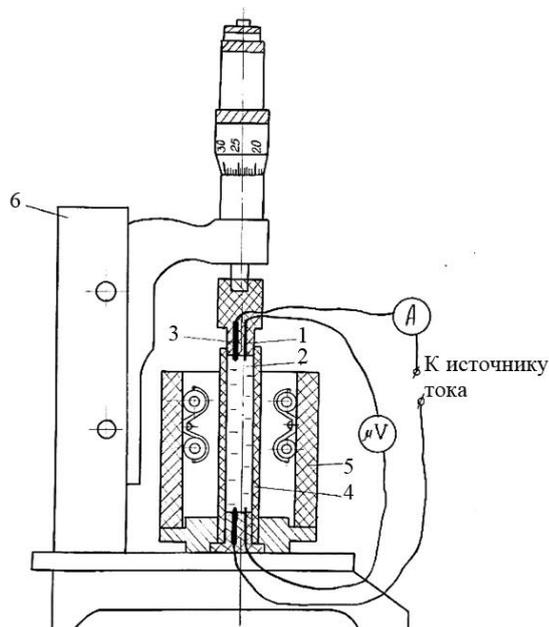


Рис. 2. Схема установки УЭС-1: 1 – жидкий металл; 2 – потенциальные зонды; 3 – токовые зонды; 4 – стеклянная изоляционная трубка; 5 – нагреватель; 6 – корпус установки

Удельное электрическое сопротивление определялось по формуле

$$\rho = \frac{\Delta U \cdot S}{I \cdot \ell}, \quad (1)$$

где ΔU – контактное падение напряжения; S – площадь поперечного сечения ЖМ-проводника; I – сила тока; ℓ – длина ЖМ-проводника, контролируемая микрометрическим винтом.

В установке УЭС-2ЛЧ (рис. 3) постоянное количество жидкого металла наливалось в два цилиндрических изоляционных сосуда, на дне которых располагались четыре зонда: в одном случае по линейной схеме, в другом – в виде четырехугольника.

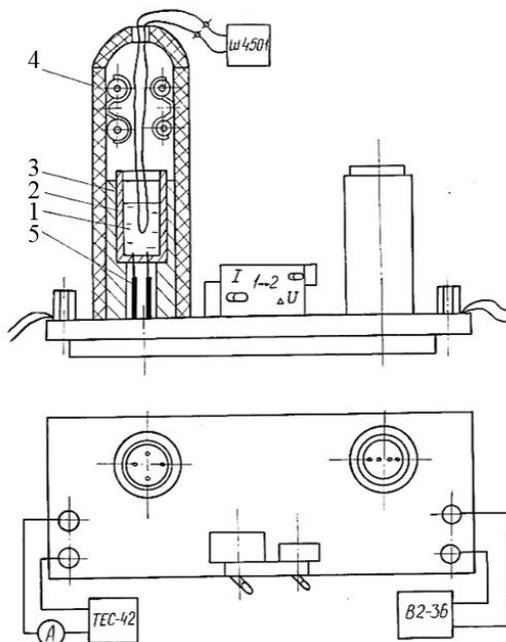


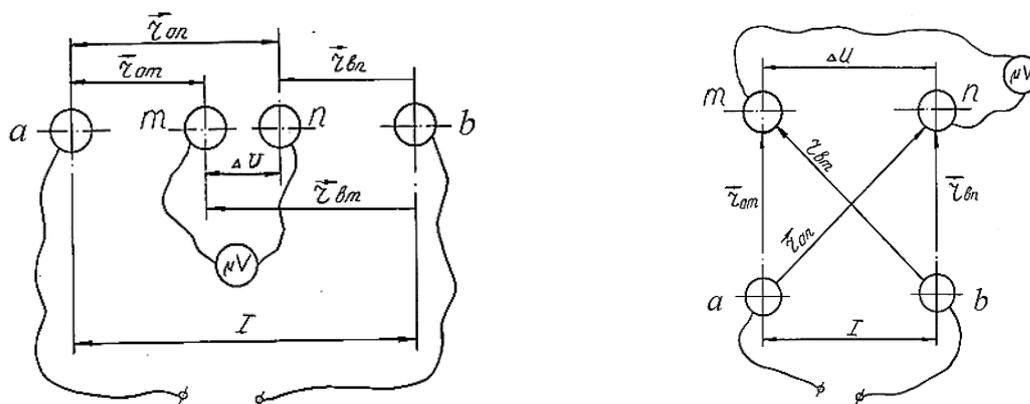
Рис. 3. Схема установки УЭС-2ЛЧ: 1 – жидкий металл; 2 – изоляционный стакан; 3 – держатель стакана; 4 – нагреватель; 5 – зонды

Удельное электрическое сопротивление определялось по формуле

$$\rho = G_1 \cdot G_2 \cdot \frac{\Delta U}{I}, \quad (2)$$

где G_1 – масштабный коэффициент, зависящий от соотношения W/B (W – высота столба жидкого металла; B – расстояние между зондами); G_2 – масштабный коэффициент, зависящий от расположения зондов.

Принципиальная схема измерений на установке УЭС-2ЛЧ показана на рис. 4.



(а) (б)

Рис. 4. Схемы измерений на установке УЭС-2ЛЧ:

линейное расположение зондов (а); в виде четырехугольника (б)

При произвольном расположении двух токовых $a-b$ (i_1, i_2) и двух потенциальных $m-n$ (u_1, u_2) зондов (см. рис. 4а) величина масштабного коэффициента G_2 определяется выражением

$$G_2 = \frac{r_{i1u1} \cdot r_{i2u2} \cdot r_{i2u1} \cdot r_{i1u2}}{(r_{i1u2} - r_{i1u1}) \cdot r_{i2u1} \cdot r_{i2u2} - (r_{i2u2} - r_{i2u1}) \cdot r_{i1u1} \cdot r_{i1u2}} \cdot B \quad (3)$$

При расположении зондов в виде квадрата (см. рис. 4б) выражение (3) преобразуется к виду

$$G_2^{\square} = \frac{2 \cdot \pi}{2 - \sqrt{2}} \cdot B, \quad (4)$$

а при равномерном расположении зондов в линию, когда потенциальные зонды $m-n$ были расположены между токовыми зондами $a-b$:

$$G_2^{-} = 2 \cdot \pi \cdot B. \quad (5)$$

Зависимость масштабного коэффициента G_1 от соотношения W/B приведена в табл. 3.

Таблица 3. Значения масштабного коэффициента G_1

W/B	G_1 для вида схемы	
	линейной	четырёхугольной
0,1	13,86	11,83
0,2	6,99	5,92
0,5	2,78	2,38
1,0	1,5	1,34
2,0	1,09	1,06
5,0	1,005	1,004
10,0	1,000 7	1,000 5

В установке УЭС-2ЛЧ применялось количество жидкого металла, соответствующее условию $W/B > 10$, что объективно позволяло считать масштабный коэффициент $G_1 = 1$. Для линейной схемы расположения зондов рассчитан масштабный коэффициент $G_2^{-} = 0,022$ м, а для четырёхугольной – $G_2^{\square} = 0,049$ м.

В экспериментах контактное падение напряжения ΔU измерялось в диапазоне температур 30...180 °С в соответствии с ГОСТ 8024-90 (в котором указаны нормы нагрева частей электрических аппаратов) при постоянном токе $I = 5$ А. Для компенсации термоэлектродвижущей силы измерения проводились с изменением направления тока.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученный в экспериментах линейный характер температурной зависимости удельного электрического сопротивления $\rho = f(T)$ галлийсодержащих материалов для ЖМК можно описать уравнением

$$\rho_T = \rho_{30} \cdot (1 + \alpha \cdot T), \quad (6)$$

где ρ_{30} – значение удельного электрического сопротивления ЖМ при температуре 30 °С; α – температурный коэффициент электрического сопротивления; T – температура измерений, °С.

Значения коэффициентов ρ_{30} и α в уравнении (6) для галлия и его эвтектических сплавов, наиболее часто применяемых в ЖМК, приведены в табл. 4 (в скобках указано содержание элементов Ga, In, Sn, Zn в % по массе). Погрешность величины ρ_{30} определялась для доверительной вероятности 0,9 при 5-кратной повторности экспериментов на каждой из установок.

Таблица 4. Значения коэффициентов температурной зависимости удельного электрического сопротивления галлийсодержащих ЖМ-материалов

Материал	Ga	GI (77,5/22,5)	GIS (62/25/13)	GISZ (64/12/13/11)
$\rho_{30}, 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$	25,78±2,53	30,37±2,55	33,56±1,86	34,0±0,97
$\alpha, 10^{-5} \text{ град}^{-1}$	116	93	86	97

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Жидкометаллические электрические контакты, особенно композиционные, являются важным направлением развития сильноточной многоамперной энергетики, поскольку дают возможность получать низкое (в ряде случаев стремящееся к нулю) переходное электрическое сопротивление между жидкой и твердой фазами контактных деталей.

Экспериментально подтвержденный линейный характер температурной зависимости удельного электрического сопротивления галлийсодержащих материалов промежуточных ЖМ-сред дает возможность не только рассчитывать, но и прогнозировать эксплуатационные параметры и состояние ЖМК в электрических аппаратах.

Полученные в настоящей работе объективные данные об электрических (в последующих работах будут получены данные и о фрикционных) характеристиках ЖМ-материалов на основе галлия позволят создавать новые перспективные скользящие и коммутирующие контакты и конструкции электрических машин и электротехнического оборудования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в тесном сотрудничестве с коллективом кафедры прикладной физики Тверского государственного технического университета. Отдельная благодарность выражается профессору, д.т.н. Измайлову Владимиру Васильевичу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы теории электрических аппаратов / под ред. П.А. Курбатова. СПб.: Лань. 2021. 592 с.
2. Дегтярь В.Г. Жидкометаллические контакты и контактные устройства в современных условиях. Сборник докладов Международной научно-технической конференции «Электрические контакты-2002». СПб. 2002. С. 166–172.
3. Беляев В.Л. Особенности работы и конструкции многоамперных электрических аппаратов. СПб.: СЗТУ. 2005. 274 с.
4. Яценко С.П., Пасечник Л.А., Скачков В.М., Рубинштейн Г.М. Галлий: технологии получения и применение жидких сплавов. М.: РАН. 2020. 344 с.

5. Дегтярь В.Г., Нестеров Г.Г. Контактные коммутирующие устройства электрических аппаратов низкого напряжения. М.: ВИНТИ АН СССР. 1980. Т. 2. 100 с.
6. Митюрёв А.А. Фрикционные и электрические характеристики жидкометаллических контактов при граничном трении. Дисс. ... канд. техн. наук. Тверь. 1992. 253 с.
7. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Исследование электропроводности жидкометаллического композиционного порошкового материала // *Вестник Тверского государственного университета. Серия «Физика»*. 2010. Вып. 8. С. 97–106.
- 8 Li H.J., Tian P.Y., Lu H.Y., Jia W.P., Du H.D., Zhang X.J., Li Q.Y., Tian Y. State-of-the-Art of extreme pressure lubrication realized with the high thermal diffusivity of liquid metal // *ACS applied materials & interfaces*. 2017. V. 9. № 6. P. 5638–5644.
9. Li Y., Zhang S.W., Ding Q., Feng D.P., Qin B.F., Hu L.T. Liquid metal as novel lubricant in a wide temperature range from –10 to 800 °C // *Materials Letters*. 2018. V. 215. P. 140–143.
10. Guo J., Chenga J., Tana H., Zhua Sh., Qiaoa Zh., Yanga J., Liua W. Short Communication Ga-based liquid metal: a novel current-carrying lubricant // *Tribology International*. 2019. V. 135. P. 457–462.
11. Xu A., Tian P., Li H., Wen Sh., Tian Y. Extreme pressure lubrication between ceramic and bearing steel with liquid metal // *Tribology International*. 2022. V. 174. Article 107797. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X2200370X> (дата обращения: 13.09.2022).
12. Яценко С.П. Галлий. Взаимодействие с металлами. М.: Наука. 1974. 220 с.

Для цитирования: 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.

STUDY OF CHARACTERISTICS OF GALLIUM-CONTAINING MATERIALS FOR SLIDING ELECTRICAL CONTACTS WITH INTERMEDIATE LIQUID METALLIC MEDIUM

A.A. MITYUREV, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: and.mit@westa69.ru

A description is given of the designs of two installations for studying the electrical characteristics of liquid metals based on gallium and its eutectic alloys for liquid metal contacts (LMC) of electrical machines and apparatuses. The setups make it possible to determine the electrical resistivity of liquid metals, regardless of the design of liquid metal assemblies, without the formation of intermetallic compounds with gallium, in the temperature range according to GOST 8024-90 $T = 30...180$ °C. The linear nature of the temperature dependence of the electrical resistivity $\rho = f(T)$ of gallium-containing materials for LMC has been experimentally confirmed. For this temperature dependence, the values of the coefficient ρ_{30} of the specific electrical resistance of LM at a temperature 30 °C and the temperature coefficient α of the electrical resistance of gallium and its eutectic alloys are determined: GI (77,5 % Ga / 22,5 % In); GIS (62 % Ga / 25 % In / 13 % Sn); GISZ (64 % Ga / 12 % In / 13 % Sn / 11 % Zn) used in modern high-ampere electric devices, including composite LMCs.

Keywords: sliding electrical contact, liquid metal contact, boundary friction, wear, gallium, eutectic alloy, electrical resistivity, temperature dependence.

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 4 (16), 2022*

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.331:622.271

ПРОЦЕССЫ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ДОБЫЧИ КУСКОВОГО ТОРФА

А.В. КУПОРОВА, ст. препод.

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

© Купорова А.В., 2022

В статье рассмотрены основные виды формованного твердого топлива из торфа, а именно кусковой торф и брикеты. Кусковой торф добывается в полевых условиях с использованием солнечной энергии для сушки, а торфяной брикет – на заводе с использованием искусственной сушки. Самопроизвольно протекающий процесс образования структуры в кусковом торфе энергетически выгоден. Он основан на усадочных деформациях при сушке, приводящих к уменьшению размеров образца торфа. При этом усиливаются межмолекулярные взаимодействия и возникают водородные связи между элементами структуры. В торфяном брикете межмолекулярное взаимодействие обеспечивается за счет первоначальных затрат энергии на прессование дробленого торфа. Изложены основные теории структурообразования, позволяющие объяснить сложный физико-химический механизм этих процессов: роль микро- и макроструктуры; энергетический подход; влияние плотности скелета торфяных систем и комплексная оценка влияния минеральных компонентов. Даны рекомендации по применению этих теорий в технологиях добычи биогенных материалов при управлении структурообразованием в торфяных и сапропелевых системах, а также их композициях с минеральными компонентами.

Ключевые слова: кусковой торф, торфяной брикет, формованное топливо, структурообразование, межмолекулярное взаимодействие, водородная связь.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-4-25-35

ВВЕДЕНИЕ

Кусковой торф представляет собой формованное твердое топливо, используемое в энергетике и коммунально-бытовом секторе. Он также является более качественным сырьем (по сравнению с фрезерным торфом) для термохимической переработки. Метод получения кускового торфа представляет собой экструзионное формование влажной (начальная влажность $w_n = 80...86\%$) пластичной торфяной массы с последующей сушкой до уборочной влажности ($w_{уб} = 35...45\%$) в полевых условиях [1, 2].

Технологический процесс производства кускового торфа включает в себя выполнение ряда операций: экскавации торфомассы из залежи при помощи ковшей

(одноковшового или многоковшового экскаватора) или фрез (дисковых или шнековых); механического диспергирования и перемешивания извлеченного торфа; формования кусков методом выдавливания через формующие насадки (экструзии); стилки кусков на поле сушки; сушки, предусматривающей выполнение двух или трех механических операций (ворочка) для интенсификации процесса удаления влаги; подготовки к уборке (формирования валков); уборки высушенного торфа; укладки готовой продукции в полевые штабеля, где он накапливается и хранится до реализации (штабелирование). В настоящее время кусковой торф добывается двумя основными способами: экскаваторным и фрезформовочным. Они реализуются в полевых условиях с естественной сушкой, т.е. при использовании солнечной энергии [1].

Искусственная сушка применяется в заводских условиях при производстве формованного твердого топлива более высокого качества [3]. К такому топливу относятся полубрикетты, брикетты, термобрикетты и пеллеты, получаемые под высоким давлением в брикетных (или пеллетных) прессах [4]. В качестве сырья в таких технологиях, как правило, используется фрезерный торф с влажностью ~35...45 %, который в специальных сушильных установках высушивается до влажности ~10...16 %.

Технологический процесс брикетирования и (или) пеллетирования торфа состоит из стадий накопления торфа в бункерах в количестве, достаточном для бесперебойной работы технологической линии; механической подготовки торфа (дробления и разделения по классам крупности); искусственной сушки торфа в сушилках различных типов (пневмопароводяной, паровой трубчатой, пневмогазовой и т.п.) [3]; прессования торфа; транспортирования торфяных брикеттов на склад; хранения торфяных брикеттов.

Брикетированное в заводских условиях твердое топливо имеет серьезный недостаток – большие затраты энергии на искусственную сушку и формование. В этой связи (при условии снижения зависимости от погодных факторов при производстве) кусковой торф может составить серьезную конкуренцию брикетированному топливу, или, что более вероятно, дополнять потребности регионов в местном топливе [5–7].

В торфяных брикетах прочность обеспечивается за счет межмолекулярных взаимодействий, возникающих между элементами структуры при больших давлениях (искусственном создании условий, при которых частицы сближаются до расстояний, на которых действуют силы Ван-дер-Ваальса и водородные связи).

В торфяных кусках происходит коагуляционное структурообразование в пластичной торфомассе. Оно представляет собой самопроизвольно протекающий процесс сцепления частиц (агрегатов, ассоциатов, макромолекул) при сушке и усадке [8, 9]. При этом возникают коагуляционные структуры. Они образуются за счет сцепления частиц ван-дер-ваальсовыми силами в пространственные сетки, представляющие собой рыхлые каркасы из элементов структуры. Первоначально при формовании пластичной торфомассы (диспергированный торф и вода) частицы контактируют между собой через тонкие прослойки дисперсионной среды (воды). В дальнейшем при сушке и усадке частицы сближаются друг с другом, преодолевают энергетический барьер и попадают в зону действия ван-дер-ваальсовых сил. В торфе также могут действовать электростатические силы отталкивания, которые возникают из-за наличия (или образования) двойного адсорбционного слоя. Для их преодоления также необходима энергия, возникающая в процессе усадки. В формованной торфомассе при сушке создаются основные условия для возникновения усадочных процессов: «структурирующая» роль воды и отсутствие «жесткой» структуры материала [10].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Фундаментальные исследования по изучению сложного механизма процессов структурообразования в торфяных и сапропелевых системах проводились с начала 60-х годов XX века научной школой И.И. Лиштвана [11–13]. В них были выделены понятия макро- и микроструктурного уровня системы. Микроструктура состоит из связанных между собой высокодисперсных частиц – ассоциатов и агрегатов, образованных из продуктов биохимического распада растительной биомассы болот. Ассоциаты образуются из макромолекул посредством химических, молекулярных и водородных связей. Они имеют гелеобразную структуру и зависят от степени биохимической деструкции биомассы, а также количественного и качественного состава обменных катионов. Агрегаты образуются из объединений ассоциатов макромолекул. Агрегаты органического вещества торфа крайне неустойчивы. На их размер и особенности упаковки оказывают влияние влажность (особенно в конкретных локальных зонах), концентрация сухого вещества в объеме влажного материала (плотность скелета γ_0), наличие обменных катионов и других факторов. При этом макроструктура представлена грубодисперсной частью органического вещества торфа. Ее основу составляют неразложившиеся остатки растений-торфообразователей, доступные для идентификации отдельные клетки и их объединения [19].

Количественное и качественное соотношение макро- и микроструктур является определяющим в основных свойствах коагуляционных торфяных систем. И.И. Лиштван также при определении макроструктуры для объяснения особенностей структурообразовательных процессов ввел понятие «структура переплетения» [11]. Они, с одной стороны, придают торфяным системам упругость (например, при формировании кускового торфа), но, с другой стороны, при критических деформациях необратимо разрушаются. Микроструктурные элементы (комбинации макромолекул) обеспечивают высокую эластичность торфяных систем.

Типичным представителем структур переплетения является кусковой торф, получаемый резным способом. Он представляет собой, по сути, часть естественной, механически непереработанной торфяной залежи со своей структурой, поэтому в нем деформационные явления при сушке проявляются достаточно слабо (в отличие от традиционного кускового торфа) [19, 20]. В кусковом торфе преобладают малодеформируемые и нетиксотропные структуры переплетения волокон от слабообразованной болотной флоры. Коагуляционные же структуры, состоящие из агрегатов, для резного торфа имеют второстепенное значение. По мере механического диспергирования торфомассы, увлажнения и (или) внесения модифицирующих компонентов торфяная система переходит в жидкообразное состояние. В этом состоянии роль коагуляционных структур становится преобладающей. При удалении влаги (сушке) из формованного торфа в нем начинает увеличиваться количество фазовых контактов, и торфяная система из жидкообразного постепенно переходит в твердообразное условно-пластичное состояние [11–13]. Таким образом, при влажности $w = 75...83\%$, соответствующей нижней границе пластичности, торфяные системы из твердообразного состояния переходят в полутвердое, а затем в упругохрупкое с открытой пористостью. Дискуссионным в исследованиях И.И. Лиштвана является роль химических связей в обеспечении структурообразования при сушке вязкопластичных торфяных систем. По всей вероятности, они не оказывают на структурную прочность серьезного влияния, что следует из дальнейших работ по определению прочностных показателей торфяных коллоидных капиллярно-пористых тел.

В этой связи показательными являются результаты исследований научной школы А.Е. Афанасьева. В них была предпринята попытка систематизации знаний о

преобразованиях дисперсной структуры торфяных систем в процессе сушки [8, 9]. Основная роль в образовании структуры и, соответственно, обеспечении прочности отводится межмолекулярным водородным взаимодействиям. В исследованиях в первую очередь проводился анализ влияния содержания влаги в системе [15], температуры [14, 15], капиллярного давления [14], масштабного фактора [8, 9, 14], числа связей, прочности единичного контакта на протекание структурных изменений в торфяных капиллярно-пористых телах. В результате было установлено и научно обосновано наличие двух периодов в формировании структуры при удалении влаги из вязкопластичных торфяных систем в диапазоне от формовочной до равновесной влажности. Система осуществляет переход из жидкообразного состояния в твердообразное условно-пластичное в первом периоде структурообразования. Во втором же наблюдается временная стабилизация коагуляционной структуры, и система переходит из вязкопластичного в твердообразное состояние.

В качестве физического обоснования существования двух периодов структурообразования А.Е. Афанасьев представил результаты, в которых первый период объясняется преобладающим действием между структурными элементами связей Ван-дер-Ваальса, а второй – действием межмолекулярных водородных связей, которые обладают более высокой энергией связи. Такой подход позволил объяснить увеличение интенсивности роста прочности формованного кускового торфа во втором периоде структурообразования.

Зависимость прочности цилиндрических образцов торфа на одноосное сжатие от влагосодержания W и температуры T (по А.Е. Афанасьеву) определяется из соотношения [14, 15]

$$R = R_{0T} \exp\left(\frac{E_0 - \alpha W}{R^* T}\right), \quad (1)$$

где R_{0T} – исходная прочность торфа, когда влагосодержание при данной температуре снижает энергию активации процесса разрушения до нуля, Па; E_0 – максимальная величина энергии активации при влагосодержании $W = 0$, Дж/моль; α – удельная энергия активации процесса разрушения, Дж/моль; R^* – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура, К.

В дальнейшем при расчете энергии активации процесса разрушения E в коллоидных капиллярно-пористых торфяных системах была определена энергия связей, обеспечивающих прочность торфа в первом и втором периодах структурообразования (от 9,9 до 16,2 кДж/моль) [8, 9, 14, 15].

В следующих исследованиях по данному направлению в начале XXI века А.Е. Афанасьев и О.С. Мисников [10] сделали акцент на том, что торфяная система в состоянии полной влагоемкости находится в переувлажненном гетерогенном полидисперсном состоянии. Это граничное состояние является начальным с точки зрения осуществления процесса обезвоживания (сушки), который (в зависимости от вида конечной продукции (полуфабриката)) может осуществляться до конкретных величин конечной влажности ($w \approx 20...45\%$), минимальное значение которой равняется нулю. Согласно классификации М.П. Воларовича и Н.В. Чураева, в торфяных системах существуют четыре категории связи влаги с материалом с градацией по энергии связи: химически, физико-химически, осмотически и механически связанная. После удаления определенной категории влаги высвобождающаяся энергия направляется на межструктурные взаимодействия в торфяной системе, которые приводят к ее упрочнению, т.е. для нее при обезвоживании характерны закономерности поведения гетерогенной коллоидно-дисперсной системы с одновременным проявлением реологических свойств высокомолекулярных соединений [10, 16]. Таким

образом, в зависимости от содержания влаги система находится сначала в текучем (гидромасса), а затем пластичном (торф-сырец), полутвердом и твердом состояниях. Этим состояниям соответствуют определенные параметры структуры с реологическими (η_0 – пластическая вязкость, Θ – предельное напряжение сдвига) и прочностными характеристиками материала (R – прочность на одноосное сжатие или изгиб).

Торфяная система может находиться в одной из четырех основных областей («a», «b», «c», «d»), в которой рассматривается особенность процесса структурообразования и выделяются конкретные обобщенные характеристики [16]. Области «a», «b» характеризуются пластической вязкостью (уравнение Шведова – Бингама) и предельным сопротивлением сдвигу, а области «c», «d» – разрушающей нагрузкой.

Дальнейшее развитие такого подхода во всем диапазоне влажностей позволило установить пропорциональность связи между Θ и R :

$$R = K\Theta = R_{0T} \exp\left(\frac{E_0 - \alpha W}{R^*T}\right) = R_{0W} \exp\left(-\frac{\alpha W}{R^*T}\right) = R_{0W} \exp(-\lambda W), \quad (2)$$

где $K = \frac{dR}{d\Theta}$ – угловой коэффициент зависимости $R = f(\Theta_i)$, характеризующий увеличение прочности при сушке торфа и изменении предельного сопротивления сдвигу на единицу; R_{0W} – конечная прочность торфа, когда влагосодержание равно нулю, Па; λ – коэффициент структурообразования.

В результате А.Е. Афанасьевым была разработана модель

$$\Theta_i = \Theta_{0W} \exp(-\lambda_{\Theta} W) = \Theta_{0T} \exp\left(\frac{E_0 - \alpha_{\Theta} W_i}{R^*T}\right), \quad (3)$$

которая адекватно описывает процесс при сушке в «мягком» режиме и позволяет оценить основные характеристики структурообразования, равно как и энергию межмолекулярного взаимодействия $E(W)_{\Theta} = E_0 - \alpha_{\Theta} W_i$. Для этого нужно измерить предельное напряжение сдвига при конкретных влагосодержании (влажности) и температуре. Далее необходимо определить состояние материала (течение, пластичное, полутвердое и твердое), т.е. упорядочить периоды структурообразования с представлением их в полулогарифмических координатах $\ln\theta_i = f(W)$ с четырьмя периодами структурообразования. Таким образом, предлагаемая методика отличается достаточно большой трудоемкостью и сложностью, а также требует применения высокоточного аналитического оборудования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работах С.Н. Гамаюнова и Н.И. Гамаюнова [17, 18], которые проводились примерно в то же время, развивался принципиально другой подход, основанный на анализе зависимости прочности на одноосное сжатие от плотности сухого материала в объеме влажного образца (плотность скелета торфяной системы). В нем торфяное коллоидно-капиллярное пористое тело представляется как совокупность монодисперсных (модельных) частиц. Они связаны между собой силами, не равными в направлении осей координат (коагуляция). Сила разрушения межчастичных связей, направленная по нормали к плоскости скалывания, будет находиться в пропорциональной зависимости от произведения вероятностей разрыва этих связей в направлении осей координат:

$$R \sim (\alpha_x f_x \chi_x)(\alpha_y f_y \chi_y)(\alpha_z f_z \chi_z), \quad (4)$$

где α_i – постоянные, зависящие от вида упаковки частиц; f_i – энергия связи одного контакта; χ_i – количество контактов в направлении конкретной оси координат ($i = x, y, z$).

Допуская для изотропного материала в направлении осей координат равенство величин, входящих в уравнение (4), делаем вывод, что

$$R \sim (\alpha f \chi)^3. \quad (5)$$

Если сумма единичных контактов, отнесенная к единице поверхности разрушения, зависит от количества частиц, которое пропорционально массе сухого вещества в единице объема влажного материала (плотности скелета γ_0), то и прочность пропорциональна этой плотности $R \sim \gamma_0^3$ или $R^{1/3} \sim \gamma_0$. В окончательном виде

$$R^{1/3} = a\gamma_0 + b, \quad (6)$$

где a и b – коэффициенты, определяемые эмпирическим путем.

Характерно, что зависимость (6) не проходит через начало координат (рис. 1), а пересекает ось абсцисс в точке, соответствующей плотности скелета торфа $\gamma_{0п}$ при его полной влагоемкости W_p . Ниже этой плотности прочность R будет иметь отрицательные значения. При условии $\gamma_0 < \gamma_{0п}$ быстро сокращаются взаимодействия между отдельными структурными элементами, а торфяная система переходит в состояние суспензии. Естественно, при этом происходит разрушение образовавшейся ранее коагуляционной структуры материала. Происходит своего рода «растворение» ассоциатов торфа в воде. Максимальное значение оно будет иметь при плотности скелета, стремящейся к нулю ($\gamma_0 \rightarrow 0$). При этом коллоидным раствором это назвать нельзя, поскольку в системе будут присутствовать включения органического вещества торфа с размерами, которые больше, чем диаметр коллоидных частиц.

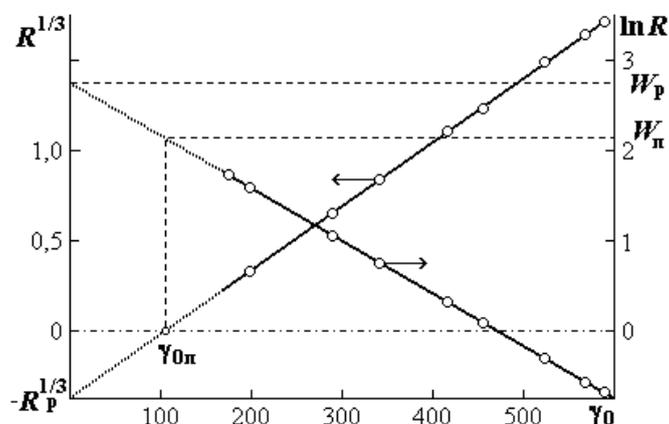


Рис. 1. Зависимости изменения прочности R , МПа, и влагосодержания W от плотности скелета γ_0 , кг/м³, кускового торфа (по С.Н. Гамаюнову)

Между элементами структуры торфа практически полностью отсутствует межмолекулярное взаимодействие. По данным источников [17, 18], численные значения свободной энергии при «растворении» торфа будут находиться в диапазоне 0,3...2,5 кДж/кг. Эти значения соответствуют пределам теплот растворения, характерным для высокомолекулярных материалов.

Таким образом, если влагосодержание торфяной системы ниже, чем состояние полной влагоемкости, в ней начинают образовываться структурные связи, которые приводят к повышению прочности: чем ниже влажность, тем выше прочностные

показатели. Они оцениваются по предельному сопротивлению сдвига и прочности на изгиб и (или) одноосное сжатие.

Более удобно для понимания и дальнейших расчетов записать уравнение (6) в виде

$$R^{1/3} = \eta(\gamma_0 - \gamma_{0п}), \quad (7)$$

где $\eta = \Delta(R^{1/3}) / \Delta\gamma_0$ – угловой коэффициент в линейной зависимости $R^{1/3} = f(\gamma_0)$.

Важным выводом в данных исследованиях явилось то, что угловые коэффициенты η зависимости (7) оставались постоянными для кусков торфа с различными исходными размерами (рис. 2). По крайней мере, это относится к промышленно выпускаемой формованной продукции и ее перспективным видам, сделанным на основе торфа (начальные диаметры $d_n = 14, 20, 30, 40, 60$ мм и длина $l_n = 1,5d_n$).

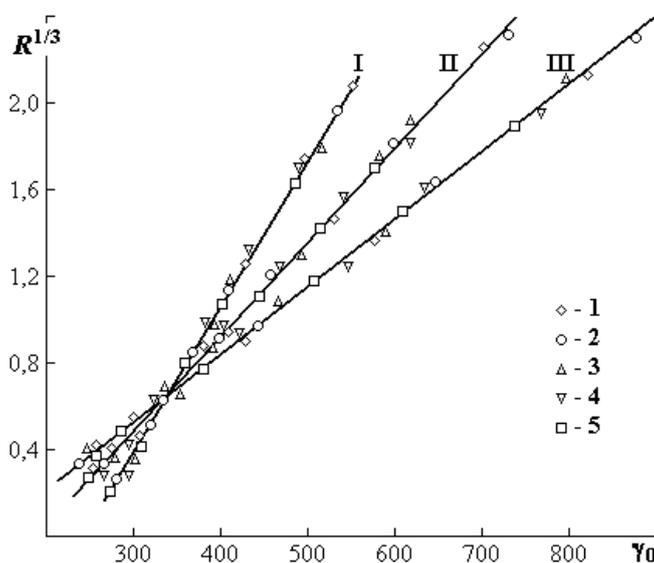


Рис. 2. Изменение прочности R , МПа, кусков из верхового (I), переходного (II), низинного (III) торфа со степенью разложения 20 % от плотности скелета γ_0 , кг/м³, с различным начальным диаметром d_n : 14 (1), 20 (2), 30 (3), 40 (4), 60 (5) мм (по С.Н. Гамаюнову)

Таким образом, текущему значению прочности структурированной торфяной системы во влажностном состоянии ниже полной влагоемкости соответствует конкретная плотность скелета. При дальнейшем уменьшении влажности γ_0 увеличивается и растет число частиц торфа в единице объема образца. При этом одновременно возрастает число контактов и энергия (количественно и качественно) взаимодействия между ними. Здесь имеется в виду количественный рост энергии связи сил Ван-дер-Ваальса, которая обратно пропорциональна расстоянию в шестой степени между центрами молекул и качественному изменению вида связей, обеспечивающих структурообразование в системе (водородные взаимодействия). Естественно, что для разрушения таких связей нужно затрачивать большую энергию. При определении величины прочности учитывается влияние масштабного фактора, поэтому размер образцов не влияет на величину угла наклона графиков, а зависит только от энергии взаимодействия между частицами торфа.

Кроме всего прочего, связность макро- и микроскопических структур торфяной системы (при схожести ряда природных факторов) предопределяется и индивидуальными особенностями растений-торфообразователей, а также групповым химическим составом органического вещества и минеральных компонентов (в основном привнесного характера), присутствующих в торфе.

В то же время при критическом увеличении содержания минеральных компонентов зависимость кубического корня из прочности от плотности скелета будет отклоняться от линейного характера. Это отклонение тем больше, чем выше зольность материала, что, например, характерно для сапропелевых систем [21].

Комплексная оценка влияния минеральных компонентов на структурообразование в органоминеральных биогенных материалах (торфе, торфяных композициях, сапропеле и т.п.) была выполнена в ряде работ под руководством О.С. Мисникова [10, 19, 21]. Основываясь на том, что содержание минеральных примесей в органоминеральных отложениях составляет до 70 % по отношению к общему количеству зольных компонентов, а также на том, что они представляют собой слабосвязанные с органической частью минеральные вещества, которые легко отделяются простейшими физическими методами, ученые выдвинули гипотезу о том, что минеральная составляющая не оказывает существенного влияния на структурообразование органоминеральных систем. Причем это относится как к естественным, так и к искусственно создаваемым композиционным материалам. Фундаментальным свойством органических (торфа, органического сапропеля) и минеральных глинистых материалов является то, что потенциал влаги (энергия, которую необходимо затратить для перевода единицы массы воды из связанного в свободное состояние) в первых примерно на два порядка выше, чем во вторых. Такая же закономерность соблюдается и при оценке величины полной влагоемкости: W_p в глине составляет около 0,5 кг/кг, органическом сапропеле – примерно 12 кг/кг, торфе – от 10 до 30 кг/кг (в зависимости от природных и технологических факторов).

На основе вышеуказанного был сделан вывод о том, что подавляющая часть всей находящейся в системе массы воды в органоминеральных материалах связана с органическим веществом. В результате этого энергия, затрачиваемая на структурные изменения в системе, зависит от количества функциональных групп OH , $COOH$ и других, обуславливающих наличие большого количества водородных связей в системе. Это, в принципе, не противоречит данным И.И. Лиштвана, Н.И. Гамаюнова, А.Е. Афанасьева, С.Н. Гамаюнова, но позволяет обосновать резкое (скачкообразное) увеличение энергии активации процесса разрушения системы «торф – вода» в точке (области), соответствующей влажности органического вещества 50 % [10] (влагосодержание органического вещества $W_o = 1$ кг/кг). Ранее в работах А.Е. Афанасьева изменение (увеличение) энергии активации процесса разрушения коллоидных капиллярно-пористых тел в зависимости от влагосодержания описывалось линейной моделью.

Для природных органоминеральных систем (сапропелей) в отличие от торфа из-за большего диапазона содержания минеральных компонентов (0...85 %) приращение энергии активации процесса разрушения ΔE более заметно для органических сапропелей. Например, в работе [14] для органического сапропеля ΔE достигла 4,2 кДж/моль. Это несколько меньше, чем расчетное максимально возможное ΔE (8 кДж/моль). Увеличение зольности сапропелей приводит к уменьшению ΔE и

смещению границы перехода от первого ко второму периоду структурообразования в область более низких влагосодержаний ($W_c \rightarrow 0$), т.е. с ростом зольности системы при формировании структуры происходит изменение функций наполнителя и матрицы. Однако в то же время для сапропелей значения E были, как и в торфе, сопоставимы с энергией межмолекулярных водородных связей. Таким образом, при обезвоживании системы до значения W_c значение энергии активации процесса разрушения сопоставимо с энергией межмолекулярных взаимодействий Ван-дер-Ваальса, а при меньших W_c – с энергией межмолекулярных водородных взаимодействий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные выше принципы и подходы позволяют осуществлять управление структурообразованием в торфяных и родственных с ними сапропелевых системах, а также их композициях с биомассой минеральными компонентами. В отношении формованного твердого топлива в виде кускового торфа наиболее целесообразно использовать физический механизм формирования структуры А.Е. Афанасьева и И.И. Лиштвана. Для резного торфа, объемы производства которого в последние 10 лет имеют стойкую тенденцию к росту, рекомендуется применять учение о микро- и макроструктурах И.И. Лиштвана. Прикладные аспекты, связанные с прогнозированием прочности формованного торфа из сырья различного типового и видового состава, разработаны С.Н. Гамаюновым. Например, в лабораторных условиях достаточно провести серию экспериментов по определению прочности на одноосное сжатие при сушке формованных образцов торфа, и можно сразу (по углу наклона зависимости $R^{1/3} = f(\gamma_0)$) выдать рекомендации по эффективности применения того или иного сырья для получения формованного твердого топлива. Для получения структур более высокого уровня прочности (например, строительных материалов на основе органических вяжущих и наполнителей, составов для борьбы с гололедицей) необходимо физико-химическое обоснование И.И. Лиштвана, А.Е. Афанасьева, Н.И. Гамаюнова. Наконец, если в системе используются минеральные глинистые компоненты (природные каталитические системы, минеральные сорбенты, органо-глинистые комплексы и т.п.), рекомендуется применять комплексную оценку их воздействия на структурообразование композиционных органоминеральных биогенных материалов. В этом случае определяемая величина скачкообразного увеличения энергии активации процесса разрушения может служить своеобразным параметром чувствительности системы к структурным преобразованиям. Этот тезис справедлив как для положительных, так и для отрицательных величин ΔE [10].

ЛИТЕРАТУРА

1. Панов В.В., Мисников О.С., Купорова А.В. Проблемы и перспективы развития торфяного производства в Российской Федерации // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017. № 5. С. 105–117.
2. Кремчеев Э.А., Михайлов А.В., Афанасьев А.Е. К вопросу оценки интенсивности удаления влаги при полевом обогащении торфа // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 1. С. 255.
3. Горячев В.И., Зюзин Б.Ф., Михеев И.И., Казичев И.Н. Технологический комплекс производства кускового топливного торфа с комбинированной сушкой // *Труды Инсторфа*. 2016. № 13 (66). С. 28–32.
4. Михайлов А.В., Большунов А.В., Кремчеев Э.А., Епифанцев К.В. Требования к торфяному сырью для производства окускованного топлива // *Горный*

информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 4. С. 59–63.

5. Афанасьев А.Е., Демин Е.А., Туровская В.В. Влияние температуры на структурообразование формованного торфа // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2007. № 3. С. 249–253.

6. Яблонев А.Л., Мисников О.С., Гусева А.М. Обоснование рациональных параметров и режимов работы перерабатывающего и формующего пресса машин для добычи кускового торфа // *Горный журнал*. 2021. № 8. С. 51–56.

7. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Определение энергоемкости процесса формования кускового торфа // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2019. № 1 (1). С. 36–45.

8. Зюзин Б.Ф., Фомин Д.С. О влиянии физико-механических свойств исходного торфа на процесс механического диспергирования // *Труды Инсторфа*. 2013. № 7 (60). С. 49–52.

9. Афанасьев А.Е., Гамаюнов С.Н., Мисников О.С. Структурообразование при сушке сапропелей различной зольности // *Коллоидный журнал*. 1999. Т. 61. № 3. С. 303–308.

10. Афанасьев А.Е., Мисников О.С. Оценка структурных характеристик при сушке формованных органических и органоминеральных биогенных материалов // *Теоретические основы химической технологии*. 2003. Т. 37. № 6. С. 620–628.

11. Лиштван И.И. Современные представления о некоторых физико-химических свойствах торфа // *Химия твердого топлива*. 1977. Т. 11. № 3. С. 35–39.

12. Абрамец А.М., Лиштван И.И., Чураев Н.В. Использование макромолекулярных соединений для контроля внутреннего массопереноса в гранулированном материале // *Журнал инженерной физики*. 1982. Т. 43. № 6. С. 1389–1394.

13. Лиштван И.И. Проблемы теплопереноса и строения в легкодеформируемых природных дисперсных системах // *Журнал инженерной физики и теплофизики*. 1993. Т. 64. № 6. С. 606–614.

14. Афанасьев А.Е., Болтушкин А.Н. Изучение структурообразования при сушке коллоидных капиллярно-пористых тел различных размеров // *Коллоидный журнал*. 1987. Т. 49. № 6. С. 1043.

15. Афанасьев А.Е. Максимальная прочность формованной продукции из торфа // *Горный журнал*. 1991. № 1. С. 13.

16. Афанасьев А.Е., Ефремов А.С. Взаимосвязь структурообразования с плотностью жидкости капиллярно-пористых тел при сушке // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2010. № 7. С. 307–314.

17. Гамаюнов Н.И., Гамаюнов С.Н. Массоперенос в торфах // *Почвоведение*. 2005. № 3. С. 337–344.

18. Гамаюнов Н.И., Гамаюнов С.Н. Теплоперенос в открытых системах. Тверь: ТГТУ. 2009. 255 с.

19. Мисников О.С. Изменения водно-физических свойств торфа и торфяных залежей при техногенном воздействии // *Техника и технология горного дела*. 2019. № 2 (5). С. 19–32.

20. Мисников О.С., Тимофеев А.Е., Пухова О.В. Получение формованных сорбционных материалов на основе торфоминеральных композиций // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2014. № 4. С. 2–13.

21. Афанасьев А.Е., Гамаюнов С.Н., Мисников О.С., Пухова О.В. Физические процессы в технологии торфяного и сапропелевого производства // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 1999. № 3. С. 146–149.

Для цитирования: Купорова А.В. Процессы структурообразования в технологии добычи кускового торфа // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2022. № 4 (16). С. 25–35.

STRUCTURING PROCESSES IN LUMP PEAT PRODUCTION TECHNOLOGY

A.V. KUPOROVA, Senior Lecturer

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: a-kuporova@inbox.ru

The lump peat and peat briquettes are the main types of molded solid peat fuel. The lump peat is mined in the field using solar energy for drying, and peat briquette is produced at the plant using artificial drying. The spontaneous process of forming a structure in lump peat is energetically beneficial. It is based on shrinkage deformations during drying, leading to a decrease in the size of the peat sample. At the same time, intermolecular interactions are strengthened and hydrogen bonds arise between the elements of the structure. In peat briquette intermolecular interaction is provided due to initial energy consumption for crushed peat pressing. The article discusses the main theories of structure formation, which make it possible to explain the complex physicochemical mechanism of these processes: the role of micro- and macrostructure; an energy approach; impact of the skeleton density of peat systems and a comprehensive assessment of the impact of mineral components. Recommendations are given on the application of these theories in technologies for the extraction of biogenic materials in the management of structure formation in peat and saprope systems, as well as their compositions with mineral components.

Keywords: lump peat, peat briquette, molded fuel, structure formation, intermolecular interaction, hydrogen bond.

Поступила в редакцию/received: 07.07.2022; после рецензирования/revised: 09.08.2022;
принята/accepted: 02.09.2022

УДК 622.23.05:622.7

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ (НА ПРИМЕРЕ МАШИНЫ ДЛЯ ДОБЫЧИ КУСКОВОГО ТОРФА МТК-16)

К.В. ФОМИН, д-р техн. наук

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

© Фомин К.В., 2022

В процессе эксплуатации на режцы рабочих органов торфяных фрезерующих агрегатов действуют значительные нагрузки, что приводит к их деформации или разрушению. В связи с этим растут затраты мощности, нарушаются технологические требования к получаемой продукции, снижаются производительность и надежность

агрегата. Таким образом, оценка прочности режущих элементов при выполнении технологической операции на стадии проектирования является актуальной задачей. В статье представлена методика моделирования напряженно-деформированного состояния режущих элементов торфяных фрезерующих агрегатов с целью оценки их статической прочности на стадии проектирования. При этом использованы система автоматизированного проектирования КОМПАС-3D и специализированный расчетный модуль АРМ FEM. Представлен расчетный пример анализа нагруженности ножей машины для добычи формованного кускового торфа МТК-16. Проведен анализ напряженно-деформированного состояния режущих элементов при взаимодействии с древесными включениями. Рассмотрен вопрос влияния затупления режущей кромки резцов на коэффициенты запаса по пределу прочности и текучести. Представленный материал может быть полезен при проектировании новых и модернизации существующих торфяных фрезерующих агрегатов с целью повышения их надежности.

Ключевые слова: торфяной фрезерующий агрегат, фреза, режущий элемент, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, прочность.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-4-35-45

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации на режущие элементы рабочих органов торфяных фрезерующих агрегатов действуют значительные нагрузки, которые носят случайный периодический характер [1–3].

Во время выполнения технологической операции возможны как внезапные поломки ножа, вызванные превышением допустимой нагрузки [1], так и постепенные отказы, связанные с накоплением усталостных повреждений и износом ножей. Совместное действие этих факторов приводит к постепенному уменьшению ресурса работы инструмента и выходу его из строя [1]. При этом наибольшее влияние на надежность торфяных фрезерующих агрегатов оказывает наличие древесных включений в залежи [2, 4]. Это связано с тем, что энергоемкость фрезерования древесины, как правило, на два порядка выше, чем торфа [1]. Само взаимодействие имеет малую длительность и носит ударный характер. Увеличение динамических нагрузок в этом случае значительно повышает интенсивность отказов режущих элементов [1, 2].

Состояние режущих элементов на рабочих органах в значительной степени влияет на эффективность процесса фрезерования [1, 5]. При износе режущих кромок, деформации или разрушении ножей происходит повышение затрат мощности, нарушаются технологические требования к получаемой продукции, ухудшается производительность и снижается надежность агрегата.

Таким образом, оценка прочности режущих элементов торфяных фрезерующих агрегатов и разработка путей повышения прочности и долговечности их на стадии проектирования являются актуальными задачами.

МАТЕРИАЛЫ, МОДЕЛИ И МЕТОДЫ

Расчет режущих элементов на статическую прочность – один из важнейших этапов при проектировании торфяного фрезерующего агрегата. Возможны как проектировочный, так и проверочный типы расчета. В первом задают величину нагрузок, прочностные характеристики материала и рассчитывают геометрические размеры резца. Во втором при известной геометрии резца и заданных нагрузках (рис. 1) определяют действующие напряжения и их эквивалентные значения (в соответствии с выбранными теориями прочности), а также коэффициенты запаса.

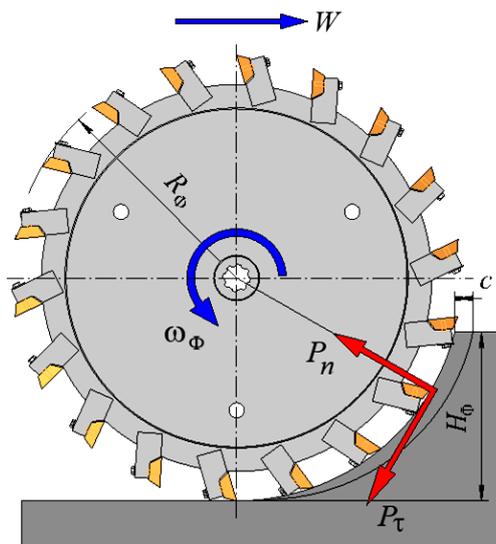


Рис. 1. Силы, действующие на режущий элемент фрезы

В настоящее время при расчете режущих элементов торфяных фрезерующих агрегатов применяют приближенные методы сопромата для оценки прочности режущих элементов [1, 6]. При этом оценивают опасное сечение и определяют действующие напряжения. Сравнивая их с допускаемыми напряжениями при учете коэффициента запаса, делают вывод о прочности резца. Данный подход неточен и не позволяет оценить прочность режущих элементов для многих расчетных случаев. Он применим для ножей простой геометрической формы.

В горных отраслях промышленности все большее применение при прочностном анализе находят как аналитические [6], основанные на методах теории упругости и пластичности, экспериментальные [7], так и численные методы [8].

Использование современных методов трехмерного твердотельного моделирования позволяет проводить анализ напряженно-деформированного состояния достаточно сложных моделей режущих элементов. При этом применяют разнообразное программное обеспечение, базирующееся на методе конечных элементов. Этот метод основан на разбиении твердотельной модели на конечное число элементов, составлении и последующем решении системы линейных алгебраических уравнений [9]. Для элементов, соединенных узлами, вводится набор функций, описывающих напряжения и перемещения в этой области. Взаимодействие между областями осуществляется через узлы, к которым могут быть приложены внешние нагрузки (силы и моменты).

В настоящее время для разработки 3D-моделей деталей и сборок механических систем, а также для проведения расчетов различного типа на стадии проектирования широко используется КОМПАС-3D [10] совместно с прикладной библиотекой АРМ FEM. Последняя включает в себя инструменты подготовки модели к анализу, формирования нагрузок и граничных условий, а также генератор конечно-элементной сетки и постпроцессор [10].

К рассчитываемой модели могут быть приложены силовые факторы различных типов [10]: равномерно распределенное давление по нормали к поверхности; равномерно распределенная сила к грани или ребру модели, задаваемая в глобальной системе координат; линейное и угловое ускорение; удельная сила по длине ребра и по площади; распределенный момент. Кроме того, могут быть заданы температура и гидростатическое давление, действующее на поверхности детали. При создании

конечно-элементной сетки для моделей сложной геометрической формы может быть проведено адаптивное разбиение, когда генератор сетки автоматически (с учетом необходимого коэффициента сгущения) варьирует величину шага разбиения [10].

АРМ FEM позволяет исследовать напряженно-деформированное состояние объекта, оценить коэффициенты запаса как при статических нагрузках, так и при оценке усталостной прочности при различных воздействиях [10].

В случае выполнения технологической операции нагрузка на фрезу складывается из нагрузок, возникающих при фрезеровании торфа и древесных включений [1, 2]. Наибольшее воздействие на режущий элемент оказывает сила резания, возникающая в процессе взаимодействия с древесным включением. Это связано с тем, что прочностные свойства древесины, как правило, на два порядка выше, чем торфа [1].

При оценке прочности режущего элемента, связанной с возможностью внезапной поломки ножа, которая может произойти из-за превышения допустимого предела прочности или пластичности, необходимо рассматривать расчетный случай возникновения максимально возможной силы сопротивления на ноже. Этот случай соответствует взаимодействию режущего элемента с древесным включением при максимальной толщине стружки и при полном использовании ширины ножа. При этом в процессе работы фрезерующего агрегата происходит износ режущей кромки режущего элемента, что приводит к резкому увеличению нагрузки на ноже. Кроме того, должны учитываться центробежные силы, действующие на элементы конструкции резца, которые при существующих режимах работы могут иметь значительную величину.

Если учитывать опыт прочностных расчетов в горных отраслях промышленности [6, 8], то к основным повреждающим воздействиям следует отнести изгибающие (касательные P_τ и осевые P_o) и сжимающие (радиальные P_n) силы (см. рис. 1), максимальные величины которых (при взаимодействии ножа с древесным включением) могут быть определены через коэффициент резания древесины:

$$P_\tau = b\delta_{\max} \left(k_o + \frac{\gamma_d V_p^2}{2 \cdot 10^3} \right);$$

$$P_n = \psi P_\tau;$$

$$P_o = \eta P_\tau,$$

где b – ширина ножа; δ_{\max} – максимальная толщина стружки [1]; k_o – коэффициент сопротивления резанию пней [1], кПа; γ_d – плотность древесины; V_p – скорость резания [1], м/с ($V_p = \sqrt{W^2 \pm 2WV \cos \omega_\phi t + V^2}$, где W – поступательная скорость агрегата; V – окружная скорость фрезы); ψ – коэффициент пропорциональности между тангенциальной и нормальной силой; η – коэффициент пропорциональности между тангенциальной и осевой силой.

Максимальная толщина стружки может быть определена как [1]

$$\delta_{\max} \approx c \sin \varphi_1,$$

где c – подача на один режущий элемент [1] ($c = \frac{2\pi W}{z\omega_\phi}$, где z – число ножей в плоскости резания; ω_ϕ – угловая скорость вращения фрезы); φ_1 – угол поворота фрезы,

соответствующий максимальной толщине стружки [1] ($\varphi_1 = \arccos \frac{R_\Phi - H_\Phi}{R_\Phi}$, где R_Φ – радиус фрезы; H_Φ – глубина фрезерования).

Коэффициент сопротивления резанию древесины k_δ [1], кПа:

$$k_\delta = \left[a_\delta \left(78 - 0,9V_p + \frac{60}{\delta_c} \right) \right] 10^2,$$

где a_δ – коэффициент, зависящий от породы древесины; δ_c – средняя толщина стружки, мм, $\delta_c \approx cH_\Phi / (R_\Phi \varphi_k)$, где φ_k – угол контакта ножа с залежью [1], рад:

$$\varphi_k = \left(\arccos \frac{R_\Phi - H_\Phi}{R_\Phi} + \arcsin \frac{c}{2R_\Phi} \right).$$

При использовании АРМ FEM сила резания прикладывается к передней поверхности режущего элемента на площади, ограниченной глубиной резания (соответствующей максимальной толщине стружки) и шириной рабочего органа.

В процессе взаимодействия рабочего органа с торфяной залежью происходит интенсивное изнашивание режущих элементов и затупление режущих кромок. По данным, приведенным в работе [1], радиус закругления режущей кромки после одного сезона работы может составлять для тарельчатых ножей 0,1–0,4 мм, грибковых – 0,3–0,9 мм, штифтовых – 0,2–0,9 мм. Это приводит к увеличению сил сопротивления резанию. В этом случае выражение для коэффициента сопротивления резания древесины необходимо скорректировать. Получаем

$$k_{\delta p} = \left[a_p a_\delta \left(78 - 0,9V_p + \frac{60}{\delta_c} \right) \right] 10^2,$$

где a_p – коэффициент, учитывающий закругления режущих элементов. Значения коэффициента a_p (согласно рекомендациям, изложенным в работе [11]) представлены в табл. 1.

Таблица 1. Зависимость коэффициента a_p от радиуса закругления резца [11]

Радиус закругления режущей кромки, мкм	2–10	15–20	21–35	36–40	41–45	46–50	51–55	56–60
Коэффициент a_p	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7

При использовании АРМ FEM учитываются отдельно распределенная сила, приложенная к передней поверхности режущего элемента и описываемая выражением для коэффициента сопротивления резанию древесины, а также распределенная сила, приложенная к затупленной режущей грани. Она может быть определена как

$$P_{\text{тр}} = b\delta_{\text{max}} k_\delta (a_p - 1).$$

Величину центробежной силы можно рассчитать с помощью выражения

$$P_c = m_p \omega_{\Phi}^2 R_{\Phi},$$

где m_p – масса режущего элемента.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим пример применения метода конечных элементов для оценки прочности режущих элементов на основе анализа их напряженно-деформированного состояния. Исследуемым образцом является машина для добычи кускового торфа МТФ-16. Конструктивные параметры и режимы работы агрегата указаны в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Конструктивные параметры рабочего органа МТФ-16

Радиус фрезы, м	Число ножей в плоскости резания	Ширина ножа, м	Высота ножа, м
0,59	18	0,06	0,08

Таблица 3. Режимы работы МТФ-16

Глубина фрезерования, м	Скорость перемещения, м/с	Угловая скорость фрезы, с ⁻¹	Скорость резания, м/с
0,45	0,47	37,24	21,97

В результате расчета получены кинематические характеристики фрезерования древесного включения (табл. 4).

Таблица 4. Кинематические характеристики процесса фрезерования

Подача, м	Угол контакта, рад	Средняя толщина стружки, м	Максимальная толщина стружки, м
0,004 4	1,333 4	0,002 514	0,004 27

В табл. 5 представлены рассчитанные силовые факторы, действующие на элементы конструкции режущего элемента при фрезеровании древесного включения с плотностью 850 кг/м³.

Таблица 5. Силовые факторы на режущем элементе при фрезеровании

Касательная сила, Н	Радиальная сила, Н	Сила на режущей грани ножа, Н (с учетом закругления 60 мкм, $a_p = 1,7$)	Ускорение в поле центробежных сил, м/с ²
2 155	1 293	1 471	818,22

Задание свойств материалов производится с помощью библиотеки «Материалы и Сортамент» системы КОМПАС-3D. Они представлены в табл. 6.

Таблица 6. Свойства материалов

Показатели	Державка – сталь Ст3	Нож – сталь 45
Предел текучести, МПа	235	355
Предел прочности при сжатии, МПа	410	600
Предел выносливости при растяжении, МПа	209	245
Предел выносливости при кручении, МПа	139	157
Модуль упругости нормальный, МПа	$2,1 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона	0,3	0,3
Плотность, кг/м ³	7 800	7 850

Процесс анализа напряженно-деформированного состояния режущего элемента МТК-16 вместе с державкой с помощью АРМ FEM состоит из нескольких этапов. На первом разрабатывается 3D-модель конструкции (рис. 2). При этом задаются совпадающие грани для конструкции, состоящей из нескольких взаимодействующих деталей. Далее прикладываются все типы силовых воздействий и накладываются ограничения на перемещения (рис. 2).

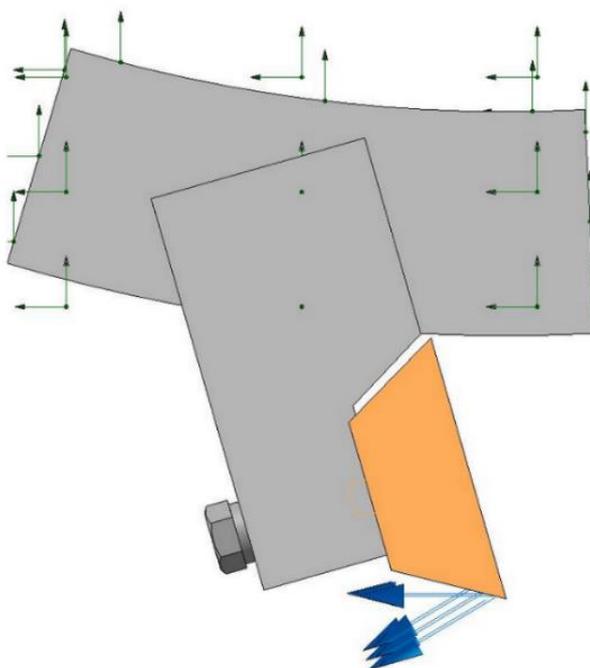


Рис. 2. Модель режущего элемента МТК-16

При автоматической генерации конечно-элементной сетки (рис. 3) задаются [10] максимальный коэффициент сгущения на поверхности, максимальная длина стороны элемента и коэффициент разрежения.

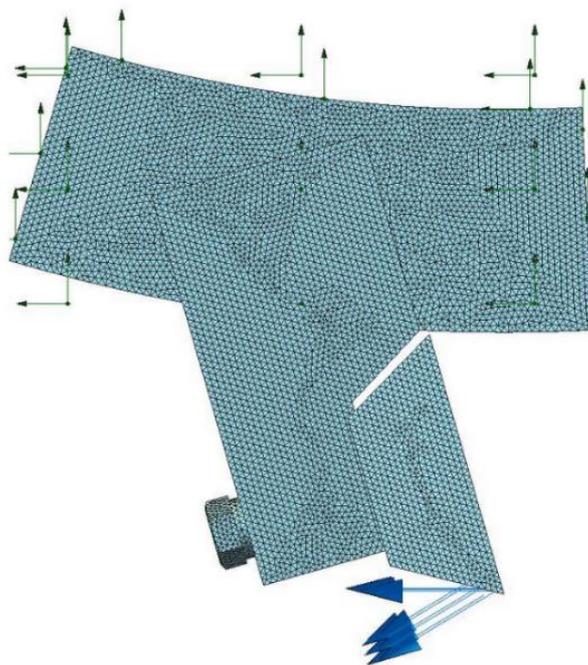


Рис. 3. Конечно-элементная модель режущего элемента МТК-16

В качестве конечных элементов используются тетраэдры [10]. При этом устанавливают длину стороны элемента таким образом, чтобы она была в 2–4 раза меньше, чем размер самого тонкого элемента модели в сборке [10].

В результате расчета были определены поля эквивалентных напряжений и суммарных перемещений. При этом рассматривались несколько вариантов нагружения режущего элемента, определяющих его прочность.

На первом этапе анализировался вариант приложения максимальной силы (при максимальной толщине стружки) при взаимодействии с древесным включением для начального этапа эксплуатации с минимальным значением радиуса закругления режущей кромки.

На рис. 4 показано распределение эквивалентных напряжений (теория прочности Мизеса), а на рис. 5 представлены смещения элементов конструкции режущего элемента под действием силовых факторов.

При нагрузках, представленных в табл. 5, максимальное напряжение находится на режущей кромке ножа и составляет 81,7 МПа, что в 4,34 раза меньше предела текучести и в 7,34 раза меньше предела прочности стали 45. Анализ напряженно-деформированного состояния показывает, что при данной схеме нагружения и при острой режущей кромке элементы конструкции режущего элемента удовлетворяют условиям прочности.

Максимальное смещение на режущей кромке ножа составляет 0,044 93 мм. При этом резбовое соединение находится вне зоны максимальных напряжений и не влияет на работоспособность реза.

На втором этапе было проведено исследование напряженно-деформированного состояния при различных величинах радиуса закругления режущей кромки, увеличение которого связано с процессами износа режущих элементов в процессе эксплуатации.

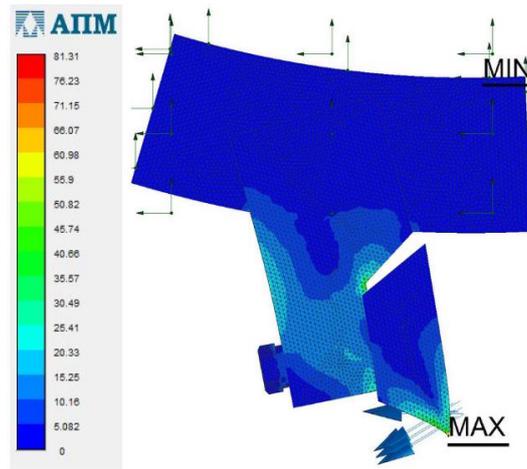


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу, МПа

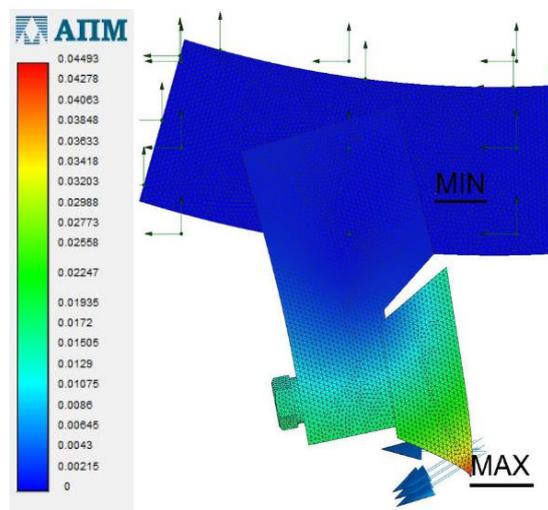


Рис. 5. Поля суммарных линейных перемещений, мм

На рис. 6 представлены графики изменения коэффициентов запаса по пределам текучести и прочности в зависимости от степени затупления ножа.

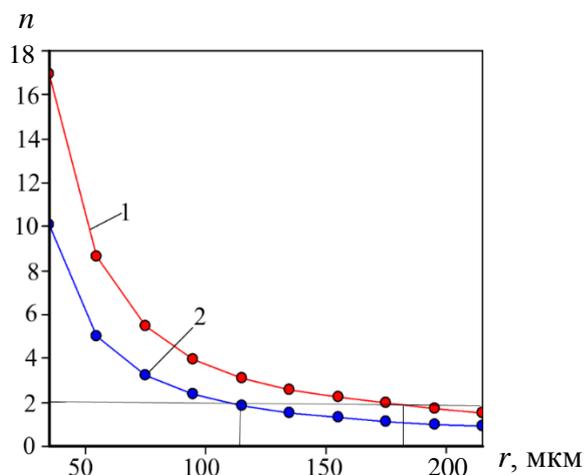


Рис. 6. Зависимость коэффициентов запаса n от радиуса скругления r режущей кромки: 1 – по пределу прочности; 2 – по пределу текучести

Максимальные значения коэффициентов запаса по пределам текучести и прочности, равные 10 и 17, наблюдаются при радиусах закругления 10–30 мкм, что соответствует показателям ножа в начале эксплуатации (до износа).

Минимальные коэффициенты запаса составляют по пределу текучести 0,9 и 1,53 по пределу прочности при радиусе закругления режущей кромки 215 мкм. Таким образом, нагрузка, вызванная повышенным износом режущей кромки, приведет к пластическому деформированию резца. При этом коэффициент запаса по пределу прочности не соответствует нормативным показателям, принимаемым на стадии проектирования для торфяных машин.

На основе рис. 6 можно оценить величину предельного износа, при которой могут быть получены необходимые коэффициенты запаса. Так, коэффициент запаса по пределу пластичности и прочности, равный 2, будет обеспечиваться при радиусах закругления режущей кромки не более 110 и 175 мкм соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье дан анализ напряженно-деформированного состояния ножей машины для добычи кускового формованного торфа с целью оценки их статической прочности с помощью системы автоматизированного проектирования КОМПАС-3D и расчетного модуля АРМ FEM. Проведено исследование влияния радиуса закругления режущей кромки на величину коэффициентов запаса по пределам пластичности и прочности.

При нагрузках, возникающих на резце с неизношенной режущей кромкой (до 60 мкм), максимальное напряжение составляет 81,7 МПа, что в 4,34 раза меньше предела текучести и в 7,34 меньше предела прочности стали, из которой изготовлен резец. В этом случае режущий элемент удовлетворяет условиям прочности.

При износе режущей кромки до радиуса закругления 215 мкм коэффициенты запаса составляют по пределу текучести 0,9 и 1,53 по пределу прочности, что говорит о возможности пластического деформирования резца.

Использование метода конечных элементов и соответствующего программного обеспечения позволяет прогнозировать параметры надежности режущих элементов на стадии проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самсонов Л.Н. Фрезерование торфяной залежи. М.: Недра. 1985. 211 с.
2. Самсонов Л.Н., Фомин К.В. Элементы статистической динамики торфяных фрезерующих агрегатов. Тверь: ТГТУ. 2005. 168 с.
3. Fomin K.V. Method for estimating the spectrum density of the resistance moment on the working body of a peat milling unit // *Journal of Mining Institute*. 2020. V. 241. P. 58–67.
4. Горлов И.В., Рахутин М.Г. Влияние пнистости залежи на безотказность торфяных машин // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017. № 12. С. 139–145.
5. Копенкин В.Д., Копенкина Л.В., Самсонов Л.Н. Развитие фрезерующих машин в торфяном производстве (анализ, перспективы) // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2003. № 10. С. 204–207.
6. Красников Ю.Д. Моделирование разрушения углей режущими инструментами. М.: Наука. 1981. 181 с.
7. Sun Y., Li X.S. Experimental Investigation of Pick Body Bending Failure // *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2018. V. 7. № 2. P. 184–188.

8. Li X., Lv Y., Zeng Q., Wang J. Research on the Strength of Roadheader Conical Picks Based on Finite Element Analysis // *The Open Mechanical Engineering Journal*. 2015. № 9. P. 521–526.

9. Фокин В.Г. Метод конечных элементов в механике деформируемого твердого тела. Самара: Самар. гос. техн. ун-т. 2010. 131 с.

10. Ганин Н.Б. Проектирование и прочностной расчет в системе КОМПАС-3D V13. М.: ДМК Пресс. 2011. 320 с.

11. Шелгунов Ю.В., Кутуков Г.М., Ильин Г.П. Машины и оборудование лесозаготовок, лесосплава и лесного хозяйства. М.: Лесная промышленность. 1982. 520 с.

Для цитирования: Фомин К.В. Оценка прочности режущих элементов на основе анализа их напряженно-деформированного состояния (на примере машины для добычи кускового торфа МТК-16) // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2022. № 4 (16). С. 35–45.

**ESTIMATION OF THE STRENGTH OF CUTTING ELEMENTS BASED
ON THE ANALYSIS OF THEIR STRESS-STRAIN STATE
(USING THE EXAMPLE OF A MACHINE FOR MINING LUMP PEAT MTK-16)**

K.V. FOMIN, Dr. Sc.

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

In the process of operation, the cutters of working bodies of peat milling agents are subjected to significant loads, which leads to their deformation or destruction. It leads to increased power consumption, violation of technological requirements to the obtained products, reduction of productivity and reliability of the unit. Therefore, the evaluation of the strength of the cutting elements when performing a technological operation at the stage of designing is an actual task. The article presents a methodology of computer simulation of the stress-strain state of the cutting elements of peat milling units in order to assess their static strength at the design stage. The means of computer-aided design system KOMPAS-3D and the specialized design module APM FEM are used. A calculation example of the analysis of loading of knives of the machine for extracting molded lumpy peat MTK-16 is presented. The analysis of stress and strain state of cutting elements during interaction with wood inclusions is carried out. The influence of blunting of cutting edge of cutters on factors of safety margin of ultimate strength and fluidity is considered. The presented material can be useful in designing new and modernization of existing peat milling units in order to increase their reliability.

Keywords: peat milling unit, cutter, cutting element, finite element method, stress-strain state, strength.

Поступила в редакцию/received: 01.07.2022; после рецензирования/revised: 09.08.2022;
принята/accepted: 02.09.2022

К ВОПРОСУ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ПРОСЕИВАНИЯ ГРАВИА ПО ПОВЕРХНОСТИ ЖЕЛОБООБРАЗНОГО ВАЛКОВОГО СИТА

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

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

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

Представлены результаты исследований движения и распределения зерен гравия в зависимости от их крупности по наклонной поверхности желобообразного валкового сита. Изучен процесс просеивания мелкой фракции гравия по ширине желоба со шнековым интенсификатором. Получены параметры разделительного устройства, обеспечивающие наибольшую эффективность грохочения каменного материала за счет рационального распределения фракций материала по валковому сити.

Ключевые слова: желобообразное валковое сито, поверхность желоба, угол подъема, крупность камня, шнековый интенсификатор, частота вращения шнека, частота вращения дисков, распределение зерен гравия, подача материала, эффективность грохочения.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-4-46-53

ВВЕДЕНИЕ

Результативность процессов грохочения гравия и щебня во многом определяется интенсивностью распределения компонентов смеси по поверхности сита, когда толщина разделяемого материала становится минимальной, вследствие чего все зерна (крупные и мелкие) находятся непосредственно на поверхности решета, что создает наиболее благоприятные условия для просеивания мелких частиц. На применяемых грохотах, например барабанных и вибрационных, ускоренное распределение материала по просеивающей поверхности достигается за счет повышения скорости его транспортирования. Однако известно, что повышение скорости движения материала по сити неизбежно вызывает снижение вероятности попадания в просеивающие отверстия мелких частиц, которые их проскакивают, что, в свою очередь, снижает эффективность грохочения каменной массы [1]. Для разрешения данного противоречия была предложена конструкция разделительного устройства в виде желобообразного валкового сита, движение материала на котором происходит по зигзагообразной линии, когда частицы материала поднимаются по стороне желоба (по вращающимся дискам) и скатываются вниз, одновременно продвигаясь вдоль валов в сторону разгрузки [2–4]. При этом валы с дисками образуют сторону желоба с постепенным увеличением ее крутизны, что должно обеспечивать разную высоту подъема зерен материала по стороне желоба в зависимости от их массы (размера). Такая конструкция способствует интенсификации процесса распределения частиц по поверхности сита, когда крупные частицы находятся в нижней части желоба, а мелкие – в верхней зоне просеивающей поверхности. В связи с этим качественные показатели просеивания зерен нижнего класса на желобообразном валковом сите должны быть достаточно высокими. С целью подтверждения выдвинутой гипотезы необходимо было провести ряд экспери-

ментальных исследований по изучению влияния распределения компонентов разделяемой смеси по желобообразной поверхности на эффективность грохочения материала.

Планируемые экспериментальные исследования были направлены на решение задач:

установление зависимости угла подъема камня по стороне желоба от его размера (массы) и влияние крупности материала на его продольную скорость движения вдоль валов желоба;

исследование просеиваемости гравия по ширине желоба в зависимости от кинематических параметров вращения валов с дисками и шнекового интенсификатора;

определение влияния кинематических параметров желобообразного валкового сита на эффективность грохочения каменного материала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения первого этапа исследований по изучению движения отдельных камней использовалась свободная поверхность валкового желоба, состоящая из шести валов с дисками шестигранной формы. Схема желобообразного валкового сита представлена на рис. 1. Угол наклона просеивающей поверхности стороны желоба α изменялся от 25° внизу и до 65° вверх.

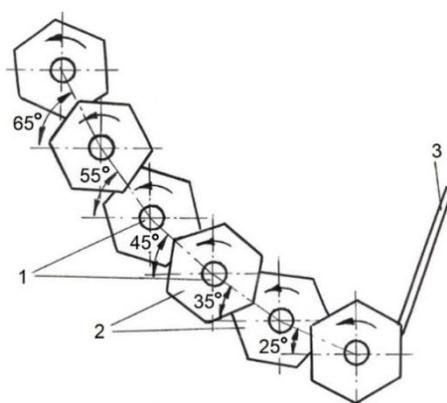


Рис. 1. Схема желобообразного валкового сита:
1 – валы; 2 – диски; 3 – боковина

Параметры лабораторного стенда: длина валов 600 мм; межосевое расстояние между валами 240 мм; диаметр дисков 340 мм; толщина дисков 8 мм; промежуток между смежными дисками вала 30 мм; продольный угол наклона валов желоба по ходу движения материала $\gamma = -5^\circ$; частота вращения валов с дисками $n = 105$ об/мин. В качестве материала использовались отдельные каменные включения, средний размер которых и масса представлены в таблице.

Зависимость веса камня от его среднего размера

Средний размер камня, мм	30	65	95	125	155	185
Масса камня, кг	0,05	0,31	0,94	3,21	5,62	9,23

Методика проведения экспериментов заключалась в подаче отдельных каменных включений на желобообразную поверхность. Камни по зигзагообразной траектории двигались вдоль валов 1 (см. рис. 1), постоянно поднимаясь и скатываясь по

вращающимся диском 2 стороны желоба. При этом боковина 3 останавливала скатывающиеся камни, которые затем опять поднимались по стороне желоба. В процессе экспериментирования фиксировались высота подъема камня по стороне желоба и время его движения вдоль валов устройства.

Общий вид лабораторного стенда желобообразного валкового сита показан на рис. 2.

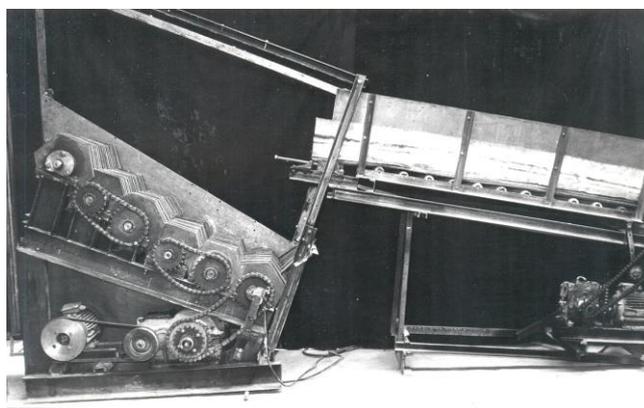


Рис. 2. Общий вид стенда желобообразного валкового сита

Для выполнения исследований по изучению распределения количественного показателя просеиваемости материала по ширине боковой поверхности желоба использовалась схема желобообразного валкового сита со шнековым интенсификатором (рис. 3) [5–7]. Шнек выполнял дополнительные функции распределения материала как по ширине желоба, так и вдоль желобообразной поверхности. Лопасти шнека были выполнены из транспортной ленты: диаметр лопастей 920 мм; шаг навивки лопастей 230 мм. Кинематические параметры стенда изменялись в конкретных пределах: частота вращения валов с дисками $n = 70 \dots 141$ об/мин; частота вращения шнека $n_{\text{шн}} = 31 \dots 51$ об/мин. Под просеивающей поверхностью по всей ширине стороны желоба размещались контейнеры (ящики) для сбора нижнего класса каменного материала. В качестве материала использовалась гравийная смесь с фракционным составом: нижний класс 10...30 мм – 50%; верхний класс 30...70 мм – 50%. Подача материала на желобообразное валковое сито составляла 90...360 кг/мин.

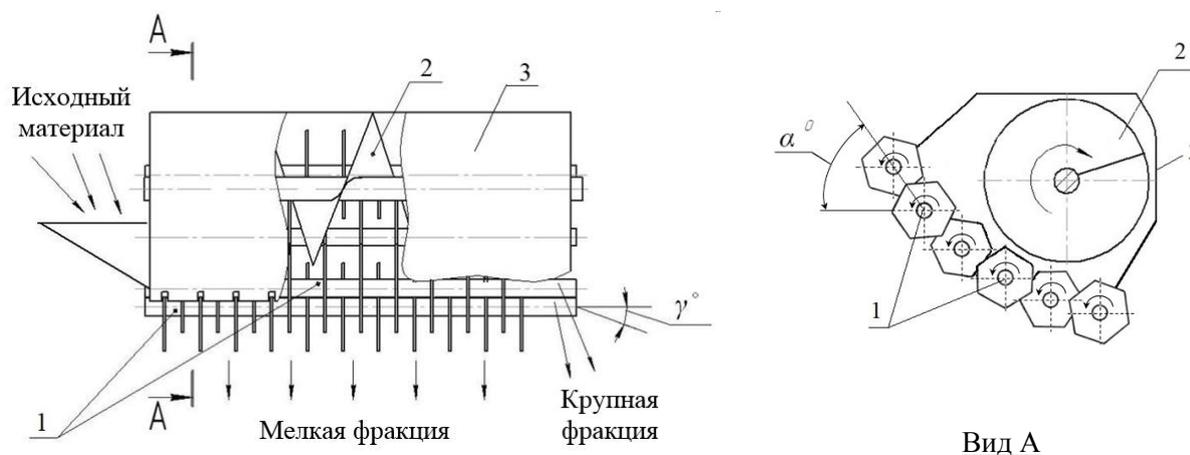


Рис. 3. Схема желобообразного валкового сита со шнековым интенсификатором:
1 – валы с дисками; 2 – шнек; 3 – боковая стенка

Материал подавался с ленточного транспортера в лоток, а затем в нижнюю часть желобообразного валкового сита. Гравий подхватывался вращающимися дисками 1 (см. рис. 3) и лопастями шнека 2, которые распределяли его в зависимости от крупности зерен на соответствующую высоту (угол подъема) стороны желобообразной поверхности. Затем камни скатывались вниз, где останавливались боковой стенкой 3, одновременно с этим материал перемещался вдоль валов 1 устройства. Далее такой цикл движения материала повторялся. При этом мелкие зерна гравия просеивались в промежутках между дисками и попадали в соответствующие контейнеры. После прохождения материала по грохоту содержимое контейнеров взвешивалось, а также оценивалось количественное распределение просеянного материала по ширине желоба. В процессе экспериментирования определялась и эффективность грохочения гравия в зависимости от изменения кинематических параметров разделительного устройства.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование отдельных каменных включений по поверхности валкового сита показало, что чем меньше был размер (масса) камня, тем он выше поднимался по стороне желоба (рис. 4). Так, например, самый маленький камень со средним размером 30 мм (0,05 кг) поднялся по стороне желоба до угла $\alpha = 35^\circ$, а самый большой камень со средним размером 185 мм (9,23 кг) поднялся только до угла $\alpha = 23^\circ$. Можно заключить, что чем меньше средний размер камня, тем больше амплитуда его движения по ширине желоба. Это, в свою очередь, создает условия для распределения по ширине поверхности желоба частиц материала в зависимости от величины его размера, что должно способствовать более результативному просеиванию каменной массы.

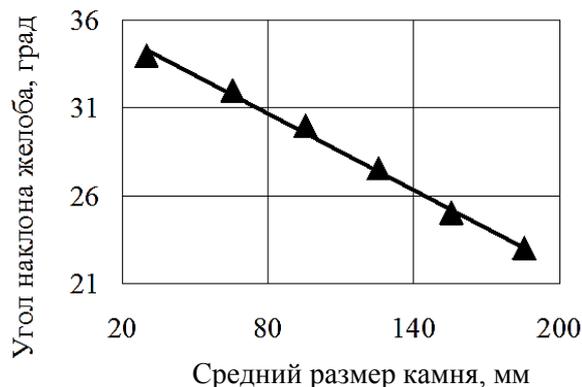


Рис. 4. Зависимость угла подъема камня от его среднего размера

Другим важным обстоятельством, характеризующим движение отдельных каменных включений по ситам, является ускоренное продвижение крупной фракции материала вдоль валов желоба, причем чем больше был размер (вес) камня, тем он быстрее перемещался (рис. 5). Графическая зависимость показывает почти четырехкратное увеличение продольной скорости движения камня размером 185 мм по сравнению с самым маленьким камнем, размер которого составлял 30 мм. Принимая во внимание существенно большее время нахождения на желобообразном разделительном устройстве мелких частиц в сравнении с крупными включениями, можно прогнозировать повышение вероятности просеивания нижнего класса гравия.

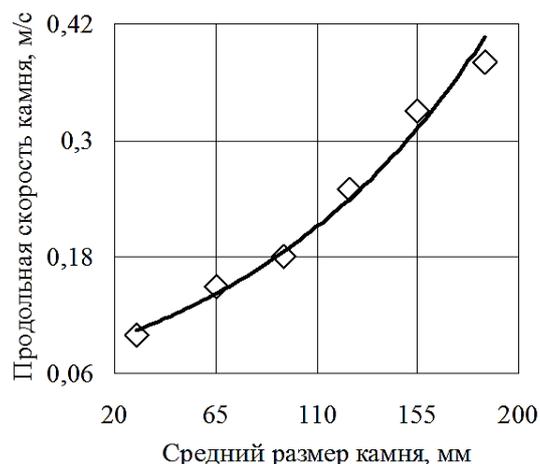


Рис. 5. Влияние размера камня на его продольную скорость

Просеивание мелкой фракции материала по ширине желоба изучали на желобообразном валковом сите со шнековым интенсификатором (рис. 6). Вначале эксперименты проводили с варьированием частоты вращения шнекового интенсификатора от 31 до 51 об/мин. При этом подача гравийной смеси на сито составляла 360 кг/мин, а частота вращения валов с дисками – 129 об/мин. Полученные зависимости представлены на рис. 6. Можно наблюдать наибольшую интенсивность просеивания материала в средней части стороны желоба в интервале значений углов наклона α от 30 до 50° при всех значениях $n_{\text{шн}}$. Так, например, при $n_{\text{шн}} = 31$ об/мин доля прошедших в отверстиях сита частиц нижнего класса составила 76,7 % (кривая 1) от всего просеянного материала, при $n_{\text{шн}} = 41$ об/мин – 75,5 % (кривая 2), а при $n_{\text{шн}} = 51$ об/мин – 67,8 % (кривая 3). В то же время следует отметить, что при $n_{\text{шн}} = 41$ об/мин происходило более равномерное распределение частиц нижнего класса по стороне желоба, а эффективность грохочения была на 2...7 % выше по сравнению с другими вариантами.



Рис. 6. Зависимость просеивания гравия по ширине желоба при частоте вращения шнека, об/мин: 1 – 31; 2 – 41; 3 – 51

Распределение просеянного материала по ширине желобообразной поверхности в зависимости от вращения валов с дисками исследовали при подаче гравия 90 кг/мин и $n_{\text{шн}} = 41$ об/мин (рис. 7). Изменение скорости вращения дисков, так же как и частоты

вращения шнека, способствовало просеиванию большей части гравия в средней части стороны желоба: при $n = 70$ об/мин – 69,64 % (кривая 1); при $n = 105$ об/мин – 75,54 % (кривая 2); при $n = 141$ об/мин – 68,74 % (кривая 3). Если первоначальное увеличение скорости вращения дисков от 70 до 105 об/мин вызвало незначительное повышение эффективности грохочения всего на 1,61 %, то дальнейшее увеличение ($n = 141$ об/мин) привело к заметному спаду интенсивности просеивания гравия на 8,59 %. Такое снижение результативности грохочения при наибольшей частоте вращения дисков объясняется тем, что в этом случае диски подбрасывают материал на большую высоту над поверхностью сита, поэтому время нахождения зерен гравия непосредственно на дисках уменьшается, вследствие чего происходит снижение вероятности их просеивания. В целом лучший результат был получен при $n = 105$ об/мин, когда эффективность грохочения гравия составила 98,93 %.



Рис. 7. Зависимость просеивания гравия по ширине желоба при частоте вращения валов с дисками, об/мин: 1 – 70; 2 – 105; 3 – 141

Для определения рациональных параметров желобообразного валкового сита на основе наибольших показателей эффективности грохочения были проведены экспериментальные исследования с варьированием частоты вращения валов с дисками и скорости вращения шнека.

Численные значения эффективности грохочения гравия, в зависимости от изменения частоты вращения валов с дисками, при $n_{\text{шн}} = 41$ об/мин показаны на рис. 8.

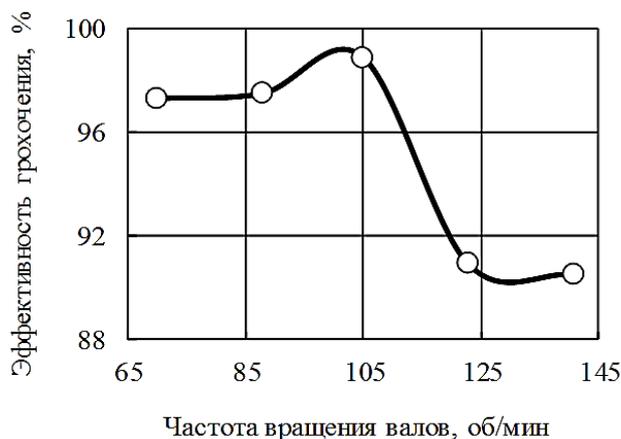


Рис. 8. Влияние частоты вращения валов на эффективность грохочения гравия

На основе представленных данных можно наблюдать постепенное повышение интенсивности просеивания гравия с возрастанием n от 70 до 105 об/мин. Затем происходило резкое падение эффективности грохочения. Это явление объясняется увеличением времени полета частиц над поверхностью сита при сравнительно высокой частоте вращения дисков, что и приводило к снижению результативности их просеивания.

Графическая зависимость эффективности грохочения гравия от частоты вращения шнекового интенсификатора в диапазоне 31...51 об/мин представлена на рис. 9. Возрастание скорости вращения шнека сначала вызывало увеличение эффективности просеивания мелкой фракции в пределах 97...99,6 %, а затем, после $n_{\text{шн}} = 105$ об/мин, происходило заметное уменьшение результативности грохочения (всего 92 %). Это говорит о том, что при сравнительно большой частоте вращения шнекового интенсификатора материал не успевает распределяться по ширине желоба, вследствие чего все большая часть частиц нижнего класса перемещается лопастями шнека вместе с компонентами верхнего класса вдоль нижних валов желоба. Таким образом, мелкая фракция гравия не успевает просеяться в промежутках между дисками.

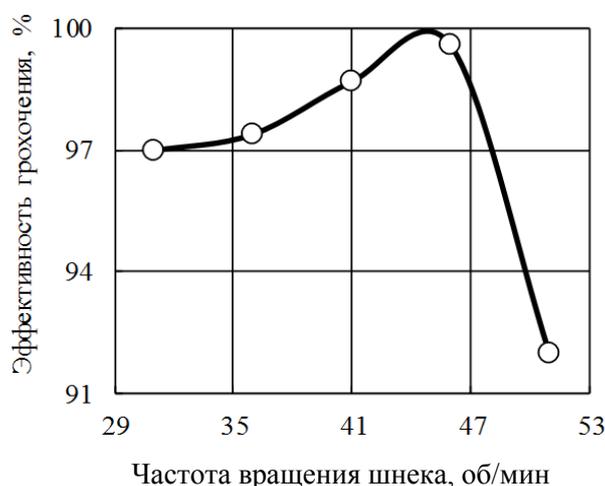


Рис. 9. Влияние частоты вращения шнека на эффективность грохочения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных экспериментальных исследований было установлено, что угол подъема материала по стороне желоба и его скорость вдоль валов сита находятся практически в прямой зависимости от среднего размера (массы) камня. Чем тяжелее камень, тем на меньшую высоту он поднимается по стороне желоба и тем быстрее движется вдоль желоба. Это позволяет последовательно (в зависимости от крупности) распределять каменный материал по стороне желоба, создавая благоприятные условия для просеивания мелкой фракции. В процессе исследований были также определены рациональные параметры численных значений частоты вращения валов с дисками $n = 100...110$ об/мин и скорости вращения шнека $n_{\text{шн}} = 41...47$ об/мин, обеспечивающие эффективность грохочения гравия более 98...99 %. Полученные результаты могут служить основанием для использования желобообразного валкового сита при фракционировании гравия и щебня на сортировочных и дробильно-сортировочных комплексах дорожно-строительных машин.

ЛИТЕРАТУРА

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 4 (16), 2022*

1. Добронравов С.С., Добронравов М.С. Строительные машины и оборудование: справочник. М.: Высшая школа. 2006. 445 с.
2. Патент СССР 1192652. *Камнеуборочная машина* / Мясников А.Б., Цыганов В.И., Кондратьев А.В. Заявл. 11.04.1984. Оpubл. 23.11.1985. Бюл. № 43.
3. Кондратьев А.В. Создание высокоэффективных валковых сепараторов торфяных машин и оборудования. Дисс... докт. техн. наук. Тверь. 1998. 361 с.
4. Сортирующе-сепарирующее устройство: а.с. 1313364 СССР. № 3888792/30-15 / Кондратьев А.В., Мясников А.Б. Заявл. 25.04.85. Оpubл. 30.05.87. Бюл. № 20.
5. Патент РФ 2286214. *Устройство для грохочения сыпучих материалов* / Кондратьев А.В., Кочкян С.М., Груздев С.В., Семин А.В. Заявл. 04.04.2005. Оpubл. 27.10.06. Бюл. № 30.
6. Патент РФ 2317864. *Устройство для грохочения сыпучих материалов* / Кондратьев А.В., Груздев С.В., Кочкян С.М., Павлов Ю.Н., Семин А.В. Заявл. 12.09.2006. Оpubл. 27.02.2008. Бюл. № 6.
7. Патент РФ 126633 на полезную модель. *Устройство для грохочения сыпучих материалов* / Кондратьев А.В., Кочкян С.М., Русинкевич В.А., Ренкус Т.И. Заявл. 29.10.2012. Оpubл. 10.04.2013. Бюл. № 10.

Для цитирования: Кондратьев А.В., Кочкян С.М., Лысенко Т.И., Гусаров А.А. К вопросу распределения и просеивания гравия по поверхности желобообразного валкового сита // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2022. № 4 (16). С. 46–53.

TO THE QUESTION OF THE DISTRIBUTION AND SCREENING OF GRAVEL ON THE SURFACE OF A THROUGH ROLL SIEVE

A.V. KONDRATYEV, Dr. Sc., S.M. KOCHKANYAN, Cand. Sc.,
T.I. LYSENKO, Senior Lecturer, A.A. GUSAROV, Assoc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: avkondr@ya.ru

The article presents the results of the movement and distribution of gravel grains, depending on their size, along the inclined surface of a trough-shaped roller sieve. The process of screening a fine fraction of gravel along the width of a chute with an auger intensifier has been studied. The parameters of the separating device have been obtained, which ensure the highest efficiency of stone material screening due to the rational distribution of material fractions over the roller sieve.

Keywords: trough-shaped roller screen, trough surface, elevation angle, stone size, screw intensifier, screw speed, disk speed, gravel grain distribution, material supply, screening efficiency.

Поступила в редакцию/received: 01.08.2022; после рецензирования/revised: 30.08.2022;
принята/accepted: 15.09.2022

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.67

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОСТУПНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ИНСТРУМЕНТОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ

Т.Б. ЯКОНОВСКАЯ, канд. экон. наук

Тверской государственной технической университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: tby81@yandex.ru

© Яконовская Т.Б., 2022

В статье описывается опыт применения аналитического инструментария Excel для анализа результатов геологического исследования торфяного месторождения. Приводится методика формирования банка геологических данных в MS Excel, а также указывается результат построения стратиграфических колонок и профилей торфяного месторождения с помощью графического инструментария и макроса VBA, используемого в MS Excel.

Ключевые слова: торфяное месторождение, геологический анализ, стратиграфическая колонка, профиль, графический инструментарий, диаграмма, VBA, MS Excel.

DOI: DOI: 10.46573/2658-5030-2022-4-54-63

ВВЕДЕНИЕ

Важным этапом, предшествующим созданию «цифрового двойника» месторождения любого полезного ископаемого, является комплексный геологический анализ. В торфяной отрасли он традиционно проводится в ручном режиме. Этот процесс весьма трудоемкий, состоит из множества видов полевых и лабораторных работ и занимает много времени при интерпретации данных. От качества, точности и достоверности информации, полученной в процессе геологического анализа, зависит принятие решения о целесообразности вложения денежных средств в дальнейшую разработку месторождения.

В большинстве горных геоинформационных систем (ГИС) процесс анализа геологической информации автоматизирован и представлен в соответствующих геологических модулях, а сами ГИС ввиду их высокой стоимости ориентированы на отрасли топливно-энергетического, рудного и нерудного комплексов, в которых имеются крупные предприятия с высокой доходностью [1, 2].

Для отраслей горнопромышленного комплекса РФ с низкой доходностью, разрабатывающих природные ресурсы регионального значения (торф, сапропель, пески, гравий, щебень и т.д.), также требуется проводить геологические изыскания и интерпретацию геологических данных, поскольку такие месторождения часто выставляются на электронные торги от администрации регионов для привлечения потенциальных инвесторов. Инвестору для принятия решения о целесообразности вложения денежных средств в разработку запасов месторождения регионального значения важно иметь достоверную и полную информацию, позволяющую провести комплексный геологический анализ.

Следует отметить, что геологический анализ для разных видов природных ресурсов имеет существенные различия и набор аналитических работ. Хотя современные горные ГИС «тяжелого класса» для повышения скорости и удобства обработки данных имеют набор шаблонов моделей месторождений, не всегда эти шаблонные модели можно использовать, поскольку вид разрабатываемого полезного ископаемого и условия его геологического формирования довольно часто могут стать существенными ограничениями при 3D-проектировании месторождения. Так, например, в популярных горных ГИС (Micromine, Surpac, K-mine) для наглядности модели месторождения торфа или сапропеля необходимо в ручном режиме подбирать масштаб [1].

Горные ГИС и специализированные модули для геологического анализа имеют высокую стоимость, сравнимую со стоимостью единицы основного технологического оборудования для добычи торфа. В связи с этим целью статьи являлось исследование возможности использования доступного инструментария MS Excel при стратиграфическом геологическом анализе торфяного месторождения.

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ ТОРФЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Системный подход активно используется в различных отраслях науки при решении многих задач научно-технического, управленческого, экономического, социального и организационного характера. Такое многообразие сфер применения системного подхода показывает его универсальность, простоту использования и понимания. Суть системного подхода заключается в рассмотрении объекта исследования как системы, поиске взаимосвязей отдельных элементов объекта и закономерностей изменения свойств объекта. Особенности системного анализа являются возможность прогнозирования, оптимизации технических и управленческих решений, а также принятие решений в условиях определенности и неопределенности, что имеет особую значимость для геологических изысканий.

Проведение геологических исследований для торфопредприятий – это весьма затратный вид работ, а точность полученных результатов зависит от полноты и комплексности геологоразведки. Так, например, для торфопредприятий геологоразведка 1 га площади торфяного месторождения стоит 100 тыс. руб. [1]. Если учитывать данные электронных торгов на право разведки и добычи торфа, то площадь торфяных месторождений изменяется в диапазоне 30–600 га, а это значит, что стоимость геологических изысканий колеблется в интервале от 3 до 60 млн руб.

Для оптимизации работ по геологоразведке и снижения их стоимости необходимо использовать методы системного анализа. С точки зрения системного подхода торфяное месторождение можно рассматривать как геологическую и производственную системы, а также как биосистему (рис. 1–3) [2, 3].

Если рассматривать торфяное месторождение как геологическую систему, то оно представляет собой череду горизонтальных напластований торфа (рис. 1) различного генетического состава, сменяющих друг друга по мере увеличения глубины торфяной залежи (вплоть до пород минерального дна). Порядок смены пластов торфа носит неслучайный характер и говорит об условиях формирования торфяного месторождения и его геологическом возрасте. Чем больше глубина торфяной залежи, тем старше эта залежь. В определенном роде торфяное месторождение представляет собой горизонтальный штрих-код, который показывает, какие происходили климатические изменения и как менялась флора в местности, где оно находится. Как правило, в большинстве известных горных ГИС 3D-модель любого месторождения представляет собой геологическое тело и часто строится по принципу геологической

системы. Однако в главном документе, отражающем качество различной торфяной продукции (ГОСТе), не указывается генетическая характеристика торфа, из которого эта продукция производится. Основными качественными свойствами торфяного сырья в ГОСТе являются степень разложения, влажность, зольность, засоренность, кислотность и наличие микроэлементов в определенном процентном составе. Эти свойства торфа в залежи носят анизотропный характер и обладают высокой изменчивостью как по глубине, так и по протяженности торфяного месторождения [4, 5].

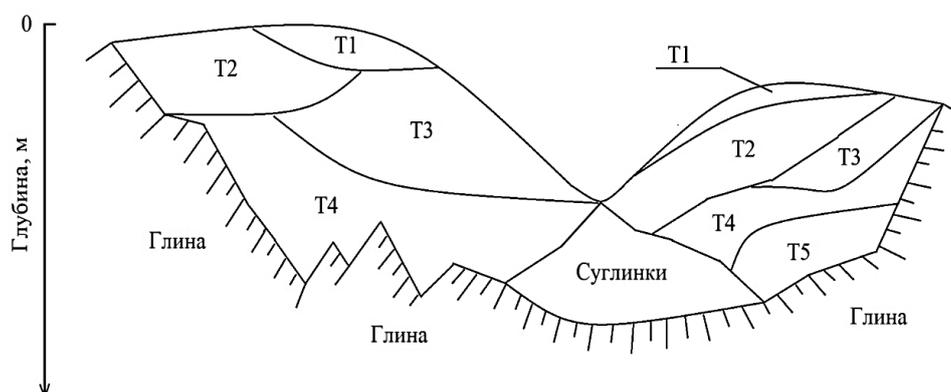


Рис. 1. Торфяное месторождение как геологическая система:
T1–T5 – слои торфа из различных растений-торфообразователей

За рубежом торфяное болото рассматривают как биосистему, основными функциями которой являются депонирование CO_2 и фильтрация воды. Торфяное болото представляет собой сложную, саморегулируемую и избыточно увлажненную природную систему, состоящую из специфической флоры (фитоценоза), занимающей определенный стратиграфический участок (рис. 2).

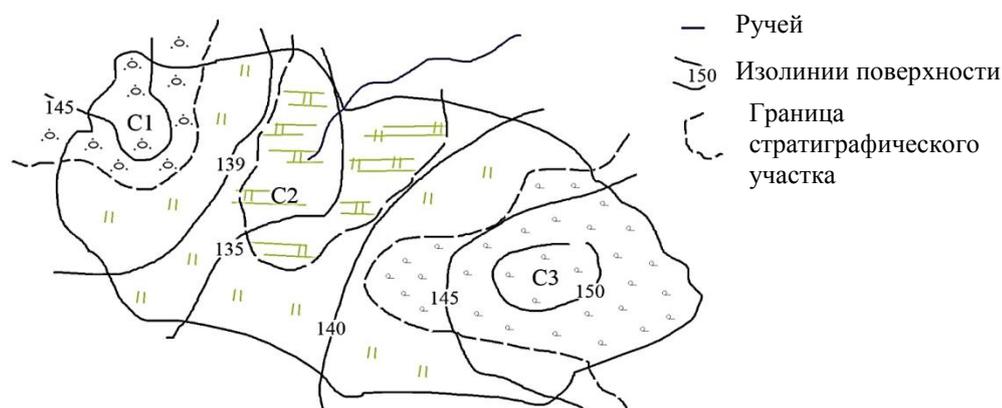


Рис. 2. Торфяное месторождение как биосистема:
C1–C3 – стратиграфические участки

В процессе разработки торфяного месторождения его рассматривают как производственную систему (рис. 3). Производственная система торфяного месторождения включает такие элементы, как каналы осушительной и противопожарной сети, мосты, переезды, водохранилище, отстойник и другие инфраструктурные объекты, использование которых позволяет добывать торф и сопутствующее сырье заданного качества. На всех стадиях процесса производства

торфа требуется проводить геологические работы различной сложности, поскольку качество торфа на производственных участках торфяной залежи может изменяться, что отразится на качестве информации, с помощью которой разрабатываются 3D-модели торфяного месторождения.

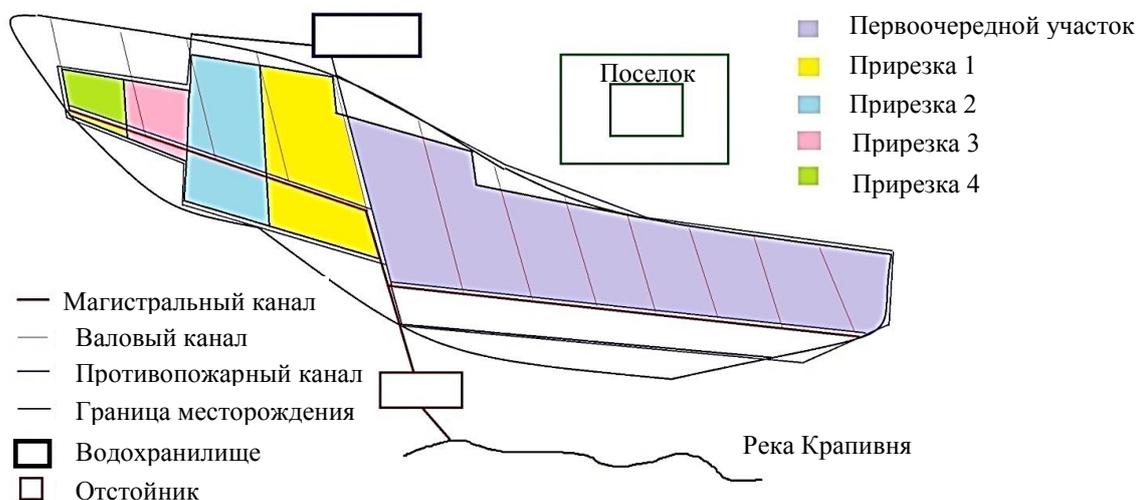


Рис. 3. Торфяное месторождение как производственная система

В настоящее время при проектировании любого месторождения требуется использовать специфические программные продукты, составляющие группу горных ГИС. При принятии решения о вложении денежных средств в разработку месторождения или о выдаче кредита технологическая часть бизнес-плана по освоению месторождения в обязательном порядке должна содержать «цифровую модель месторождения», точность которой зависит от полноты и достоверности геологической информации и геологического анализа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ БАНКА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПО ТОРФЯНОМУ МЕСТОРОЖДЕНИЮ В MS EXCEL

Геологическая информация о торфяном месторождении весьма разнообразна. Активное геологическое исследование торфяных месторождений пришлось на советское время, поэтому изученность торфяных месторождений по территориям России очень высокая. Именно тогда разрабатывались торфяные фонды по различным областям, а информация в них корректировалась и дополнялась в ручном режиме, что не исключало ошибок как в геологии месторождения и названии, так и в его географическом местоположении [6].

Материалы информационной отчетности по геологическому исследованию торфяных месторождений представляют собой множество разноплановой графической информации (фотосхемы, схемы, планы, карты и пр.); различные ведомости, в которых геологические данные представлены в табличном виде; рукописные описания торфяных залежей в виде геологических отчетов (рис. 4). В настоящее время при полевых исследованиях торфяных месторождений все чаще применяют методы геофизической разведки, поскольку точность получаемых геоданных высокая, а используемое оборудование компактное и совместимое с компьютером при помощи специализированного программного обеспечения (рис. 5). Множество форм и материалов информационной отчетности по геологическому исследованию торфяных

месторождений требует систематизации. Последняя необходима в случае проведения геологического анализа. Поскольку при организации электронных торгов на получение права пользования участком с целью разведки и добычи торфа первичную информацию о месторождении формируют региональные министерства природных ресурсов, необходимо структурировать имеющиеся по месторождениям материалы в виде электронного банка геологической информации («Геоинформационный кадастр торфяных месторождений») [7, 8].

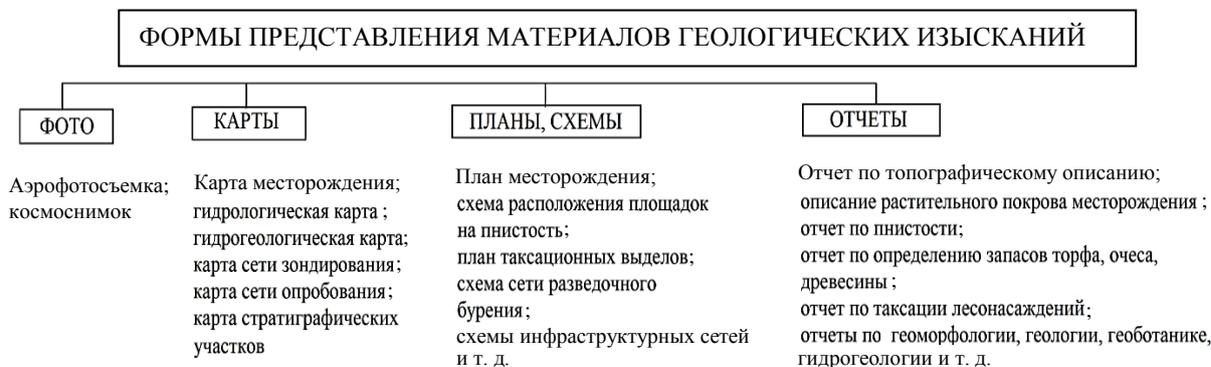


Рис. 4. Примеры представления первичной геологической информации

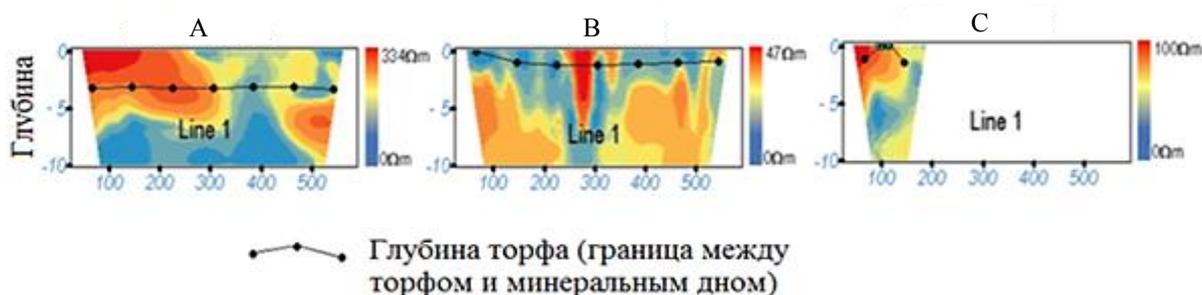


Рис. 5. Вид представления геоданных по геофизической разведке торфяного месторождения: А, В, С – участки торфяного месторождения с различной глубиной залежи [9]

Около 50 % геологической информации дается в виде письменных отчетов, таблиц, ведомостей, журналов полевых работ и наблюдений, а также специальных расчетов; до 35 % геологической информации – в виде графического материала (карт, схем, планов, диаграмм и графиков); 15 % занимает фотографическая геологическая информация, требующая дешифрирования. Таким образом, в связи с тем, что для проведения геологического анализа необходимо наличие банка геологических данных и мощного инструментального аппарата статистических функций и расчетов, использование функций «Мастер диаграмм», «Пакет анализа» MS Excel представляется актуальным для геологической информации, изложенной в табличном виде.

Суть методики формирования банка геологических данных в MS Excel (рис. 6):

1. Импорт геологической информации по конкретному месторождению из базы «Геоинформационный кадастр торфяных месторождений», разработанной в MS Access, в электронные таблицы MS Excel с использованием функции «Данные из Access».

2. Проверка информации на наличие случайных ошибочных или дублирующих данных с помощью функций «Данные: проверка данных» и «Данные: удалить дубликаты».

3. Разработка макросов для построения стратиграфических профилей и колонок по торфяному месторождению с использованием MS VBA.

4. Разработка макросов для специальных расчетов с применением MS VBA.

5. Формирование специализированных отчетов.

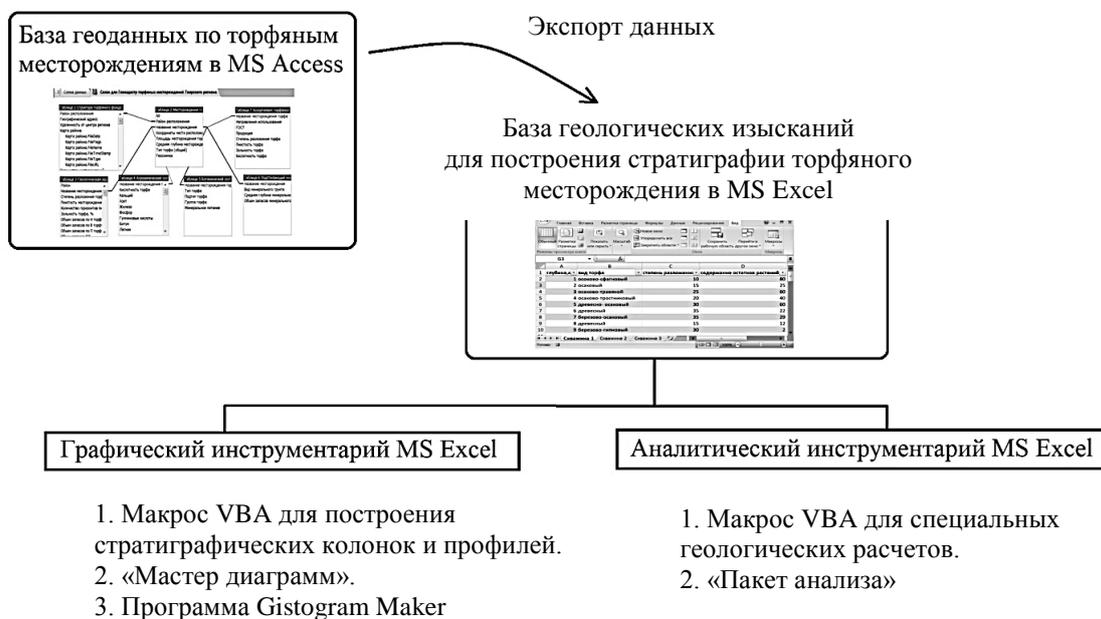


Рис. 6. Методика формирования банка геологических данных для геологического анализа

РЕЗУЛЬТАТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГРАФИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ MS EXCEL В ПРОЦЕССЕ АНАЛИЗА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Одним из главных видов геологического анализа торфяного месторождения является построение стратиграфии залежи. Это очень важный этап, так как по виду стратиграфических профилей можно выбрать алгоритм построения 3D-модели торфяного месторождения. Кроме того, стратиграфические профили представляют собой графики изменения процентного содержания остатков растений-торфообразователей как по глубине, так и по протяженности, поэтому целесообразно использовать графический инструментарий MS Excel. Стратиграфическую колонку можно построить также и с использованием функции MS Excel «Мастер диаграмм» (рис. 7). Из всех встроенных типов диаграмм больше всего для построения стратиграфической колонки подходит «линейчатая с группировкой», которая представляет собой сравнение значений по категориям с помощью горизонтальных прямоугольников. Ее вид идентичен традиционной геологической интерпретации, привычной для геологического исследования торфяных месторождений. Однако тип такой диаграммы требует небольшой доработки, поскольку не предусматривает одновременного построения графика степени разложения, изменения местоположения осей координат и подписей видов растений-торфообразователей.

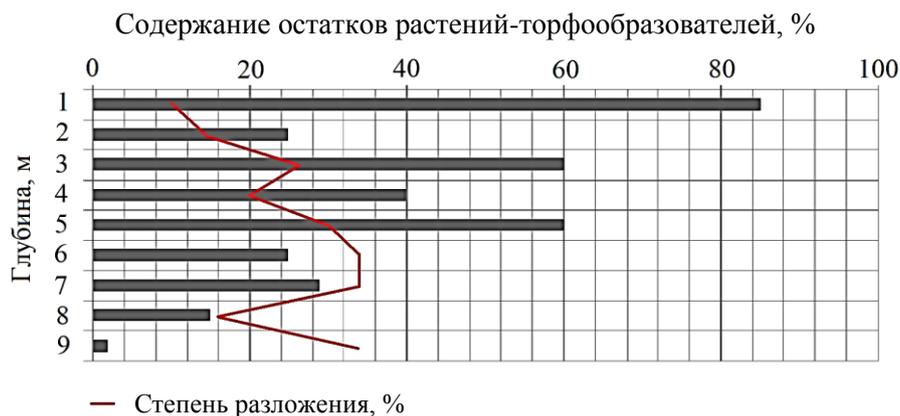


Рис. 7. Стратиграфическая колонка № 15 по пункту опробования № 3 торфяного месторождения «Тухун»

Доработка диаграммы проводилась с помощью макроса, встроенного в MS Excel и позволяющего создавать скрипты с использованием языка программирования VBA. На рис. 8 показан результат построения стратиграфической колонки в точке опробования торфяной залежи № 15 по трассе опробования № 3 с использованием макроса VBA.

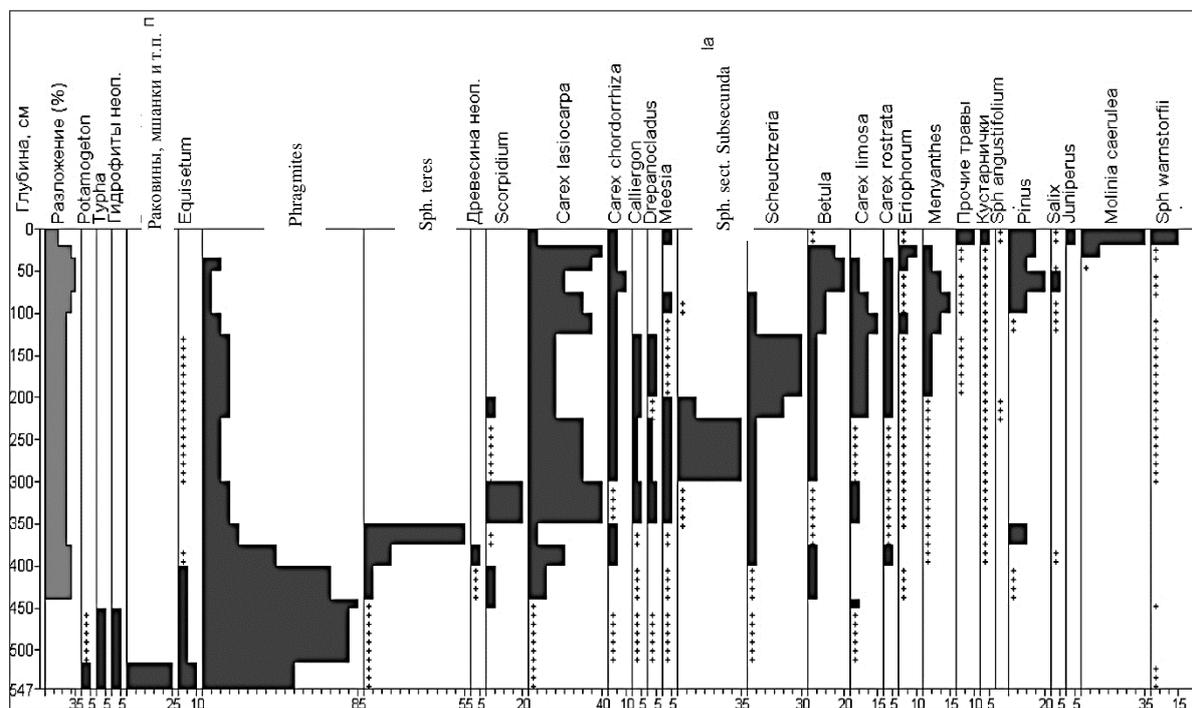


Рис. 8. Стратиграфическая колонка, построенная по процентному содержанию растений-торфообразователей торфяного месторождения после работы макроса VBA MS Excel

Макрос для построения стратиграфической колонки (см. рис. 8) разработан на основе прямоугольных автофигур, характеризующих конкретный вид растения-торфообразователя на определенной глубине торфяного месторождения. Таким образом, были получены векторные схемы, которые можно привести к растровому виду.

Существующая бесплатная программа Gistogram Maker для построения стратиграфических колонок также работает на основе базы геологических данных в MS Excel, однако не учитывает главные качественные показатели торфяной залежи: степень разложения по слоям торфа и процентное содержание остатков растений-торфообразователей. Это означает, что получаемые колонки больше похожи на схемы напластования генетических слоев торфа различной толщины, сменяющих друг друга по мере увеличения глубины (рис. 9). Причем при построении скважин отбора проб торфа (А, В, ..., J) не предусматривается шкала с протяженностью месторождения, поэтому стратиграфический профиль по таким колонкам нельзя построить без дополнительной схемы расположения скважин по поверхности торфяника [10].

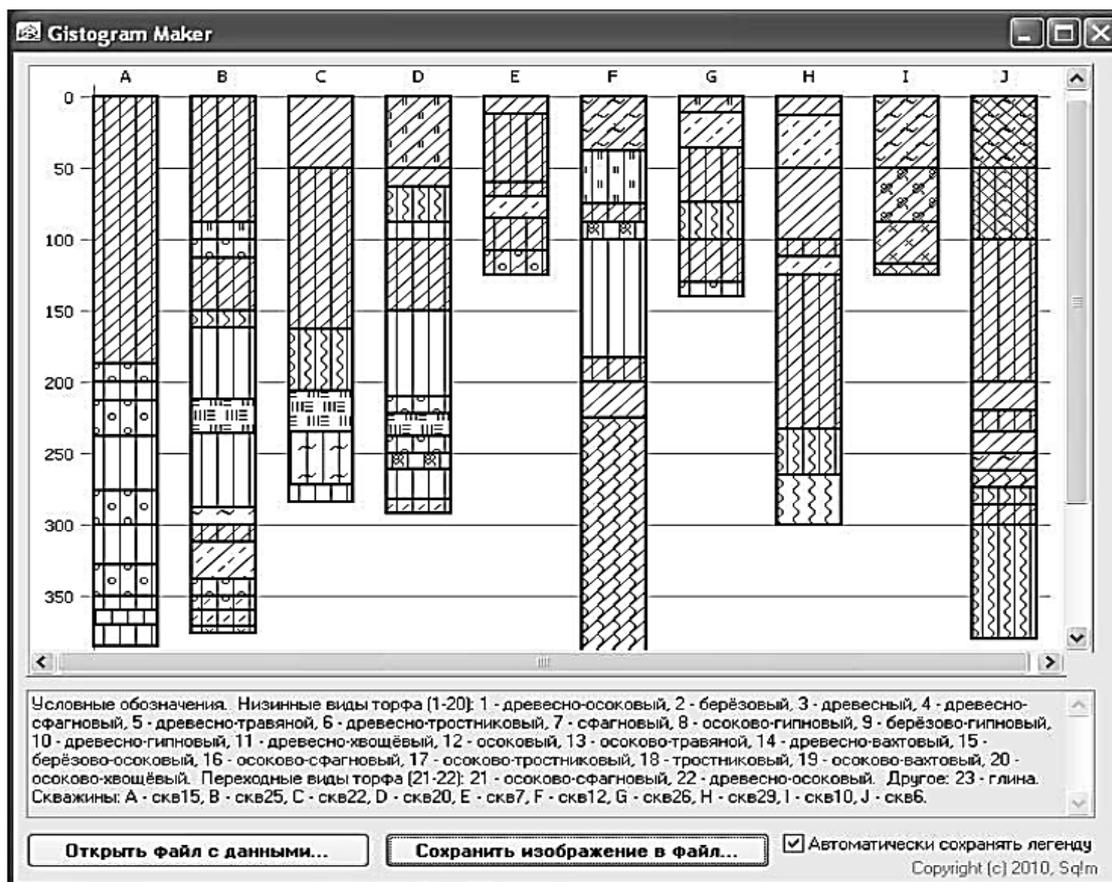


Рис. 9. Стратиграфические колонки-схемы, построенные с помощью Gistogram Maker [10]

При зондировании торфяного месторождения получают его план с сетью профилей, каждый из которых отмечает глубину торфа в залежи. Таким образом, возникает большое количество геологических данных. Они представлены в виде стратиграфических профилей, которые можно построить, используя графический инструмент MS Excel (рис. 10).



Рис. 10. Стратиграфический профиль месторождения «Тухун» по магистральному каналу, построенный средствами MS Excel

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования можно сделать выводы:

1. Многие программные продукты для геологического анализа основаны на базе данных, созданной в MS Excel.
2. Графический инструмент MS Excel можно использовать для интерпретации геологических данных, а если точнее, для построения стратиграфических колонок и профилей торфяного месторождения.
3. Макрос VBA позволяет существенно расширить возможности графического редактора MS Excel.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яконовская Т.Б. Проблемы информатизации анализа геологических данных предприятий по добыче торфа. *Интеллектуально-информационные технологии и интеллектуальный бизнес (ИНФОС-2020): Материалы XI Международной заочной научно-технической конференции*. Вологда: ВГУ. 2020. С. 89–93.
2. Яконовская Т.Б., Жигульская А.И. Классификация геоинформационных систем для горнодобывающих предприятий. *Современные технологии и инновации: Материалы V Всероссийской научно-практической конференции*. Тверь: ТвГТУ. 2021. С. 113–118.
3. Сунгатуллин Р.Х. Системный анализ, моделирование и интегральная геология // *Ученые записки Казанского государственного университета. Серия: Естественные науки*. 2006. Т. 148. № 4. С. 143–164.
4. Winter H. de la R. Time in stratigraphy // *Geobulletin Geol. Soc. South Africa*. 1997. V. 40. № 3. P. 9–16.
5. Иванов П.В. Системный анализ и оптимизация решений: учебное пособие. Новочеркасск: НИМИ ДонГАУ. 2021. 108 с.
6. Джонстон Д. Анализ экономики геологоразведки, рисков и соглашений в международной нефтегазовой отрасли / пер. с англ. Н. Селезневой. М.: Олимп-Бизнес. 2005. 451 с.
7. Яконовская Т.Б., Жигульская А.И. Проблемы информатизации технологических процессов предприятий по добыче торфа // *Актуальные направления научных исследований: технологии, качество и безопасность: Материалы Национальной (Всероссийской) конференции*. Кемерово: КГУ. 2020. С. 112–113.

8. Яконовская Т.Б. К вопросу о качестве геологической информации в торфяной сфере хозяйственной деятельности // *Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: Сборник трудов 17-й Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики*. Тула: ТулГУ. 2021. С. 488–492.

9. Яконовская Т.Б., Жигульская А.И., Яконовский П.А. Оценка использования геофизического метода VLF для определения мощности торфяного месторождения // *Горные науки и технологии*. 2020. Т. 5. № 3. С. 224–234.

10. Филиппов В.А., Филиппов Д.А. О методике построения стратиграфических колонок торфяных залежей с использованием программы Gistogram Maker // *Труды Инсторфа*. 2010. № 2 (55). С. 11–14.

Для цитирования: Яконовская Т.Б. Использование доступных информационных инструментов в геологическом анализе // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 4 (16). С. 54–63.

USE OF AVAILABLE INFORMATION TOOLS IN GEOLOGICAL ANALYSIS

T.B. YAKONOVSKAYA, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: tby81@yandex.ru

The article describes the experience of using Excel analytical tools to analyze the results of a geological survey of a peat deposit. A technique for forming a bank of geological data in MS Excel is given, and the result of constructing stratigraphic columns and profiles of a peat deposit using graphic tools and a VBA macro used in MS Excel is described.

Keywords: peat deposit, geological analysis, stratigraphic column, profile, graphic toolkit, diagram, VBA, MS Excel.

Поступила в редакцию/received: 03.07.2022; после рецензирования/ revised: 06.09.2022;
принята/accepted: 12.09.2022

УДК 681.5.015.2

ПРОГНОЗИРУЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ИНДЕКСОМ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕЛЕННОГО ЧАЯ

К.Б. ФАМ, аспирант, П.М. МУРАШЕВ, аспирант,
В.Н. БОГАТИКОВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: phambang79520897405@gmail.com

© Фам К.Б., Мурашев П.М., Богатилов В.Н., 2022

В работе описаны проектирование, моделирование и реализация системы управления на основе прогнозного управления технологическими индексами температуры воздуха и скорости конвейерной ленты в камере сушки зеленого чая при нечетком взаимодействии между температурой поверхности слоя зеленого чая и его

влажностью. Моделирование автоматизированной системы управления проводилось с использованием MatLab и Simulink. Результаты численного моделирования показывают, что прогнозирующее управление на основе технологического индекса качества стабильно и надежно с точки зрения подавления входных помех. В сравнении с традиционным многоконтурным пропорционально-интегрально-дифференцирующим регулятором система управления на основе показателя качества технологии создает условия, которые приводят к значительному улучшению производительности, а также контроля над процессом сушки.

Ключевые слова: сушка зеленого чая, прогнозирующее управление, моделирование автоматизированной системы управления, конвейерная ленточная сушилка, технологический индекс качества.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-4-63-76

ВВЕДЕНИЕ

Растениеводство и производство зеленого чая – важный вид экономической деятельности в Бразилии и Аргентине. Вместе эти страны производят около 500 тыс. тонн сухого зеленого чая в год, который продается более чем в 70 странах мира. Собирают листья зеленого чая с содержанием влаги около 70,5 % (влажная основа) и производят чай на большом количестве малых и средних предприятий, расположенных в вышеупомянутых государствах. Производственный процесс в основном включает стадию сушки в роторных или ленточных сушилках для получения обезвоженного продукта, который, как правило, используется для приготовления безалкогольных напитков. На этом этапе содержание влаги на выходе является неконтролируемым параметром, что имеет важные последствия для качества продукции и экономии энергии.

Управление процессом сушки – сложная задача ввиду наличия многих факторов, таких как нелинейность, неопределенность процесса и неточность математической модели. Исследования показывают, что способность прогнозировать переменные состояния системы в будущем периоде и определять на основе данного прогноза управляющие воздействия играет важную роль в качестве управления технологическим оборудованием. Следовательно, для повышения качества управления при неопределенности параметров функциональных компонентов необходимо применять методы проектирования, основанные на использовании регуляторов, прогнозирующих состояние технических параметров системы, и методы нечеткой логики для определения отклонения текущих значений качеств продукта от заданных.

Стратегии управления сушкой в сушилках с конвейерной лентой представлены в работе [1]. При этом температура сушки и/или скорость потока воздуха обычно являются управляемыми переменными. Для достижения высокой эффективности и точного реагирования на конечную влажность чайного листа необходимо не только регулировать температуру воздуха, но и осуществлять контроль скорости сушильного конвейера.

В настоящей работе предложена автоматизированная система управления на основе алгоритма прогнозирующего управления с учетом технологического индекса качества для управления температурой воздуха и скоростью конвейерной ленты в камере сушилки зеленого чая.

СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СУШКИ ЗЕЛЕННОГО ЧАЯ

К основным задачам управления сушкой относятся поддержание заданной температуры продукта при неопределенном возмущении и контроль движения конвейера с целью обеспечения правильного содержания влаги в чайных листьях,

предотвращения пересушивания (что увеличивает затраты энергии и может вызвать термическое повреждение) и стабилизации всего процесса.

Основными критериями оптимизации процесса сушки являются качество конечного продукта (конечная влажность зеленого чая), удельные энергозатраты (на единицу массы испаренной влаги) и время сушки. В процессе конвекционной сушки эти параметры зависят от температуры сушильной камеры и скорости сушильного конвейера. Таким образом, задача управления процессом сушки зеленого чая сводится к управлению нагревателем (чтобы слой чая быстро нагревался до заданной температуры, которая затем должна оставаться постоянной в течение всего процесса) и регулированию движения слоя зеленого чая в камере сушиллки.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Схематический вид конвейерно-ленточной сушилки для натуральных продуктов (овощей, фруктов, лечебных трав и др.) представлен на рис. 1. Сушиллка состоит из набора датчиков температуры и влажности и ленточного конвейера (1 × 5,4 м), который медленно перемещает мелкие частицы влажного слоя зеленого чая через поток сушильного агента. В качестве сушильного агента используется предварительно подогретый воздух с точно заданными характеристиками. Сушильный агент поступает по ленточному транспортеру и через зазоры снизу вверх, перпендикулярно направлению движения влажного материала.

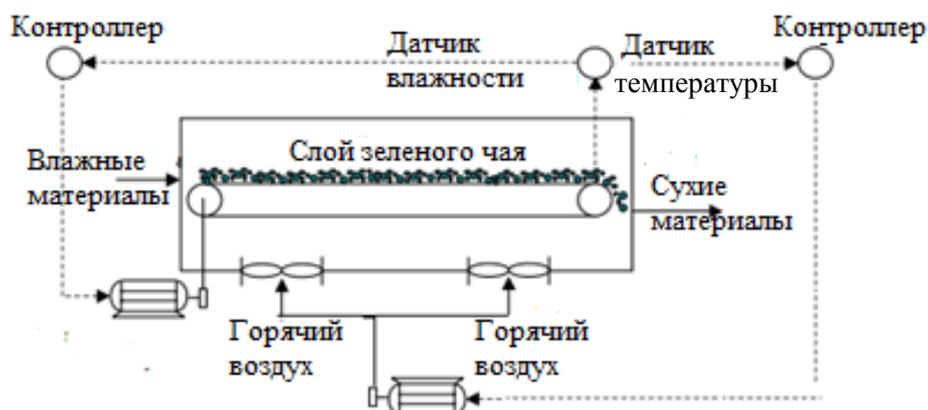


Рис. 1. Схема оцениваемой конвейерной сушилки

Для нагрева сушильного воздуха и скорости ленты используются регулируемые электронагреватели и конвейерные ролики (24 кВт). Листья зеленого чая распределяются на подносе тонким слоем (не более 30 мм). Воздух перекачивается в камеру сушки с постоянной скоростью 0,08...0,13 м/с и проверяется с помощью калиброванного анемометра с горячим проводом модели 405-V1.

Температуру внутри сушилки контролировали термопарой К-типа, чтобы подтвердить, что эксперименты по сушке проводились в изотермических условиях. Прямые показания температуры поверхности листьев были получены при использовании калиброванного инфракрасного термометра Scantemp 410 с температурным диапазоном от -33 до 500 °С и точностью ± 2 %. Массу испаряющейся влаги в процессе сушки определяли в автономном режиме путем периодического взвешивания подноса на цифровых весах (с разрешением $\pm 10^{-7}$ кг), расположенных за пределами камеры [2].

Энергетический и массовый баланс воды в стационарном элементе объема твердой фазы на конвейере описываются нестационарными одномерными дифференциальными уравнениями в частных производных первого порядка, которые определяются как:

уравнение переноса энергии [3, 4]:

$$c\rho \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где c – удельная теплоемкость сухих листьев зеленого чая; $T(x, \tau)$ – температура слоя зеленого чая; λ – коэффициент теплопроводности; x – осевое положение вдоль конвейерной сушилки;

начальные и граничные условия:

$$T(x, 0) = T_0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial x} = k (T_c - T(r, \tau)), \quad (4)$$

где r – толщина слоя; T_c – температура сушильного агента; k – коэффициенты теплоотдачи.

Уравнение переноса массы:

$$\frac{\partial M}{\partial \tau} = -u_c \frac{\partial M}{\partial x} - K(M - M_e), \quad (5)$$

где u_c – скорость конвейерной ленты; x – осевое положение вдоль конвейерной ленты-сушилки; K – коэффициент массообмена; M_e – равновесная влажность листьев чая.

Коэффициент массообмена в уравнении (5) определяется по формуле [10]

$$K = 10^{-6} T_g^{2,08} \left(\frac{G_g}{p_g} \right)^{1,11} + (2,95 \cdot 10^{-5} T_g - 1,73 \cdot 10^{-3}) \exp \left[(0,46 T_g - 61,15) \frac{G_g}{p_g} \right], \quad (6)$$

где G_g – массовая скорость сушильного воздуха; p_g – плотность воздуха.

Для получения передаточной функции процесса линейная модель системы строится путем линеаризации уравнений (1)–(4) при использовании разложения в ряд Тейлора и при нахождении преобразования Лапласа по методике из источника [5].

$$\frac{\partial^2 T(s, x)}{\partial x^2} = q \cdot T(s, x), \quad (7)$$

где $q = s \cdot \frac{c\rho}{\lambda}$.

Решение данного дифференциального уравнения (6):

$$T(s, x) = C_1 e^{\sqrt{q}x} + C_2 e^{-\sqrt{q}x}.$$

При начальном условии (3) мы получили $C_1 = C_2 = C$.

Для определения общей передаточной функции между входными и выходными переменными $T(s, x)$ и T_g можно использовать метод матрицы передачи [6]. Общая матрица передачи $A(s)$ характеризует динамическую связь между температурами воздуха T_g и тепловыми потоками:

$$\begin{bmatrix} T(s, x) \\ J(s, x) \end{bmatrix} = A(s) \cdot \begin{bmatrix} T_g(s, x) \\ J(s, 0) \end{bmatrix},$$

где $A(s) = \begin{bmatrix} e^{-\sqrt{q} \cdot r} & e^{\sqrt{q} \cdot r} / (\lambda \cdot q) \\ -\lambda \cdot q \cdot e^{-\sqrt{q} \cdot r} & e^{-\sqrt{q} \cdot r} \end{bmatrix}$.

Общая передаточная функция [6]:

$$W_1(s) = \frac{1}{1 + G_p(s)}; \quad (8)$$

$$G_{p1}(s) = \frac{\lambda}{k \cdot r} \cdot \frac{a_{11}(s)}{a_{12}(s)}. \quad (9)$$

Основные параметры (таблица) подставляются в формулы (8) и (9) для получения упрощенной передаточной функции процесса:

$$W_1(s) = \frac{400}{(450s + 1)(60s + 1)}. \quad (10)$$

Тепловые параметры процесса сушки зеленого чая

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы
Удельная теплоемкость	c	362	Дж / кг · К
Теплопроводность	λ	191,2	Вт / М · К
Плотность зеленого чая	ρ	750	кг/м ³
Удельная пористость	ε	0,97	м ² /г
Температура окружающей среды	T_0	298	К
Плотность воздуха	p_g	1 225	кг/м ³

Для передаточной функции по влажности профиль влажности по Лапласу имеет вид

$$(s + K) \cdot M(s, x) + u_c \frac{\partial M(s, x)}{\partial x} = K \cdot M_e.$$

Решив данное дифференциальное уравнение, получим передаточную функцию вида

$$W_2(s) = \frac{-95,4}{(151,25s + 0,1153)(10s + 1)}. \quad (11)$$

Взаимодействие между температурой поверхности слоя зеленого чая и влажностью чайных листьев представляет собой сложное расчетное уравнение, поэтому для моделирования такого взаимодействия в работе было предложено использовать на основе полученных экспериментальных результатов и экспертных оценок построение нечеткой аппроксимирующей системы (рис. 2) [7]. При этом предполагалось, что повышение температуры уменьшает содержание влаги, а увеличение содержания влажности снижает температуру.

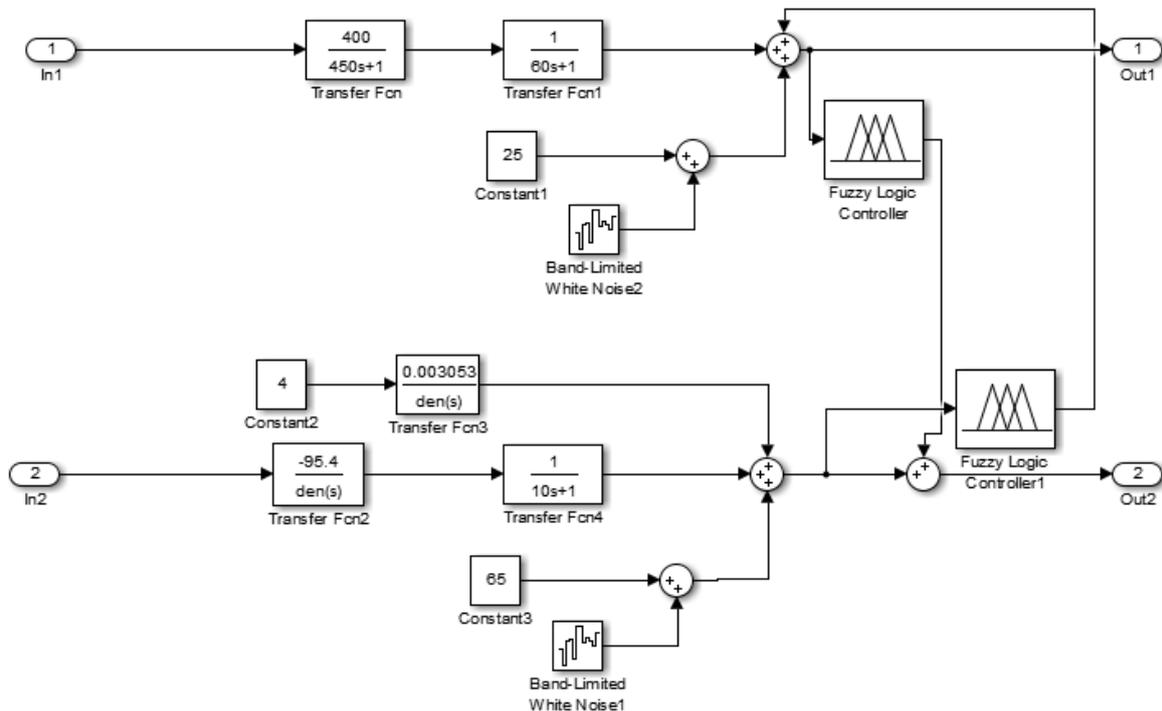


Рис. 2. Модель процесса сушки зеленого чая [7]

Общий вид окна с правилами влияния температуры поверхности слоя зеленого чая на влажность представлен на рис. 3; общий вид окна с правилами влияния влажности зеленого чая на температуру поверхности слоя показан на рис. 4.

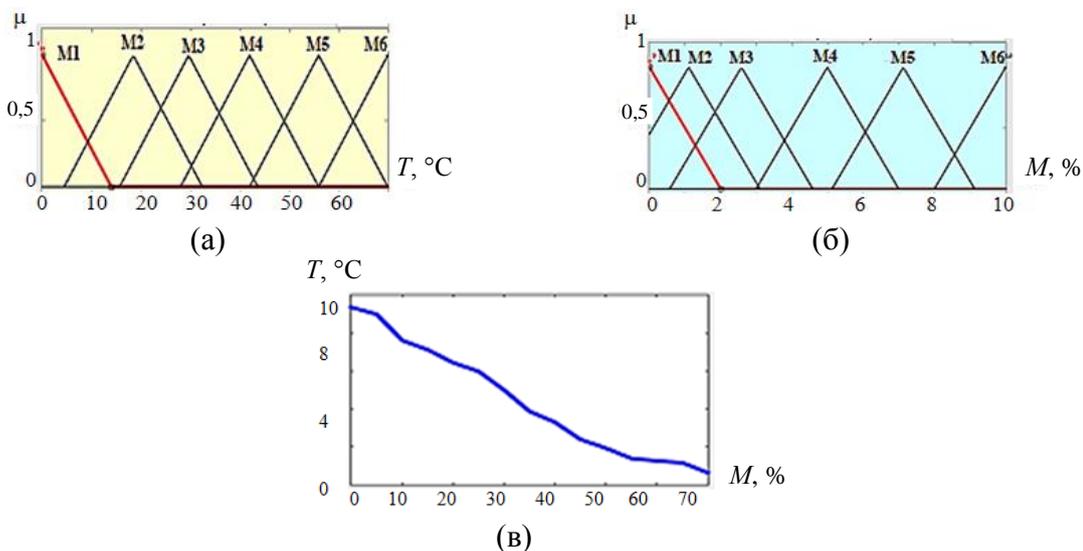


Рис. 3. Нечеткая логика и функции принадлежности влияния температуры поверхности слоя зеленого чая на влажность: функция принадлежности температуры (а); функция принадлежности влажности (б); нечеткая аппроксимация зависимости температуры от влажности (в)

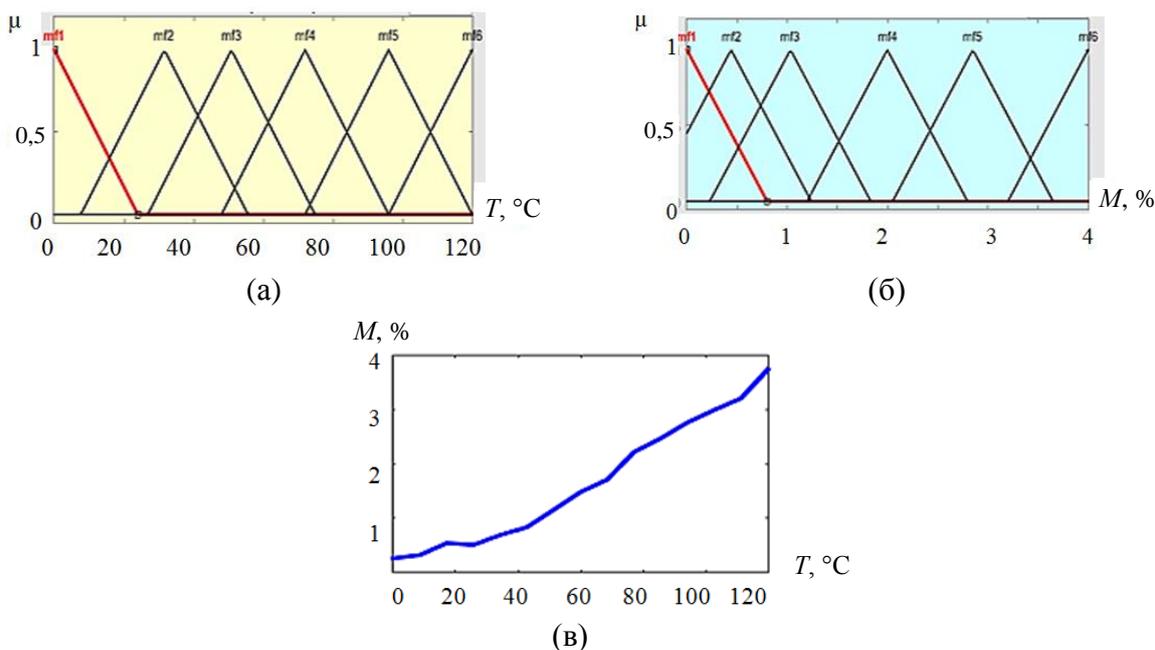


Рис. 4. Нечеткая логика и функции принадлежности влияния влажности на температуру поверхности слоя зеленого чая: функция принадлежности температуры (а); функция принадлежности влажности (б); нечеткая аппроксимация зависимости влажности от температуры (в)

Предлагаемая динамическая модель включает важные упрощения:

- 1) объемным элементом баланса массы и энергии является пористая среда, включающая жидкую и твердую фазы, представленные осушающей средой и смесью жидкой воды и сухого вещества;
- 2) перенос массы и тепла представляет собой комбинацию одновременных внутренних и внешних конечных сопротивлений;
- 3) не учитываются градиенты влажности и изменения свойств воздуха по слою ложа, что обычно принято при тонкослойной сушке;
- 4) исключается влияние усадки на скорость сушки.

Результат экспериментального исследования сушки зеленого чая представлен на рис. 5.

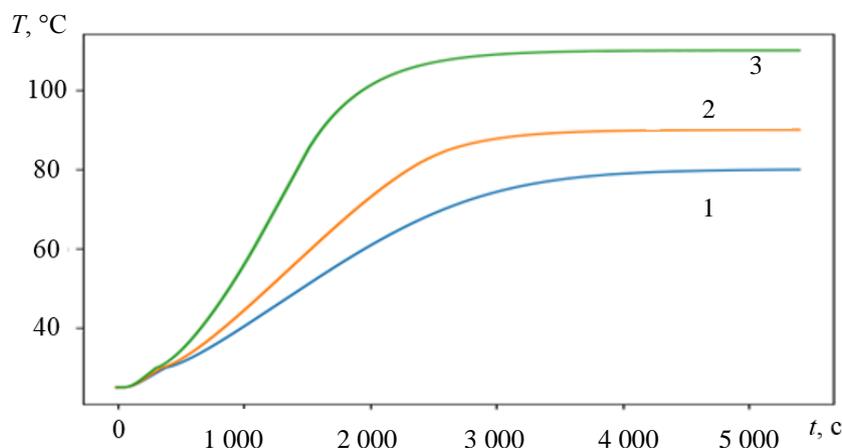


Рис. 5. Температурное поле в экспериментальном исследовании сушки зеленого чая при температуре воздуха: 1 – 80 °С; 2 – 90 °С; 3 – 110 °С

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

На сегодняшний день большинство контроллеров в управлении сушилки разработаны на основе классической теории управления. Например, применение пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулирования широко распространено благодаря его простой структуре и реализации. Однако когда входной сигнал системы управления процессом сушки зеленого чая представляет собой только идеальные показатели температуры и влажности, выходная ошибка регулятора температуры и влажности относительно велика из-за временной задержки системы. Следовательно, контроллер, отслеживающий температуру и влажность слоя зеленого чая в сушилке, должен учитывать информацию не только об идеальных заданных значениях, но о будущих таких значениях. В настоящей работе предлагается архитектура управления с отслеживанием температуры и влажности на основе алгоритма прогнозирующего управления с учетом технологического индекса качества. Под технологическим индексом качества понимается степень нечеткого равенства между значением контролируемого параметра и желаемым значением [8].

Пусть $X_p = \{X_1, X_2, \dots, X_p\}$ – множество параметров состояния процесса. Каждый параметр X_k описывается соответствующей лингвистической переменной $\langle \beta_k, X_k, D_k \rangle$. Нечеткую ситуацию параметра X_k можно выразить следующим образом:

$$\tilde{s}(X_k) = \{ \langle \mu_{\tilde{s}}(E^h)/E^h \rangle; h = 1 \dots n,$$

где n – количество термов данного параметра X .

Пусть \tilde{s}_i будет в качестве центра безопасности (ситуация технологического процесса имеет наиболее безопасный характер), а \tilde{s}_j – текущая ситуация (рис. 6).

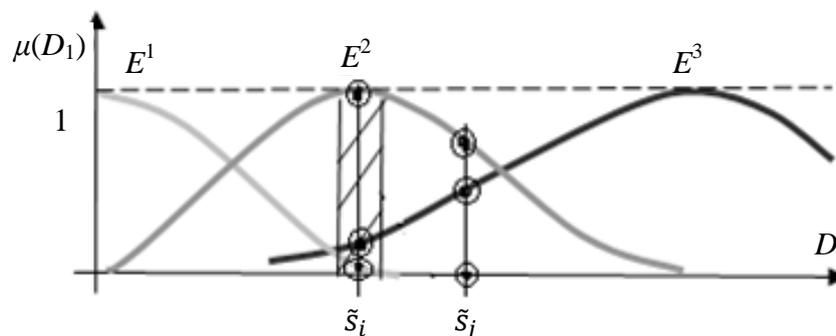


Рис. 6. Функции принадлежности лингвистической переменной $\langle \beta_k, X_k, D_k \rangle$

Индекс технологического качества процесса предназначен для определения относительного расстояния между центром безопасности и текущим значением индекса. Он вычисляется по формуле

$$In(\tilde{s}_j) = v(\tilde{s}_j, \tilde{s}_i) \& v(\tilde{s}_i, \tilde{s}_j) = (v(\tilde{s}_j, \tilde{s}_i), v(\tilde{s}_i, \tilde{s}_j)),$$

где

$$\begin{aligned} v(\tilde{s}_j, \tilde{s}_i) &= \min\{\mu_{\tilde{s}_j}(E^1) \rightarrow \mu_{\tilde{s}_i}(E^1), \mu_{\tilde{s}_j}(E^2) \rightarrow \mu_{\tilde{s}_i}(E^2), \dots, \mu_{\tilde{s}_j}(E^n) \rightarrow \mu_{\tilde{s}_i}(E^n)\} \\ (\mu_{\tilde{s}_j}(E^h) \rightarrow \mu_{\tilde{s}_i}(E^h)) &= \max\{1 - \mu_{\tilde{s}_j}(E^h), \mu_{\tilde{s}_i}(E^h)\}, h = 1 \dots n; \\ v(\tilde{s}_i, \tilde{s}_j) &= \min(\mu_{\tilde{s}_i}(E^1) \rightarrow \mu_{\tilde{s}_j}(E^1), \mu_{\tilde{s}_i}(E^2) \rightarrow \mu_{\tilde{s}_j}(E^2), \dots, \mu_{\tilde{s}_i}(E^n) \rightarrow \mu_{\tilde{s}_j}(E^n)) \\ (\mu_{\tilde{s}_i}(E^h) \rightarrow \mu_{\tilde{s}_j}(E^h)) &= \max\{1 - \mu_{\tilde{s}_i}(E^h), \mu_{\tilde{s}_j}(E^h)\}, h = 1 \dots n. \end{aligned}$$

В настоящей работе нам нужно определить индексы двух основных технологических параметров процесса: температуры и влажности поверхности слоя зеленого чая. Для установления данных индексов используются блоки вычисления в MatLab (рис. 7).

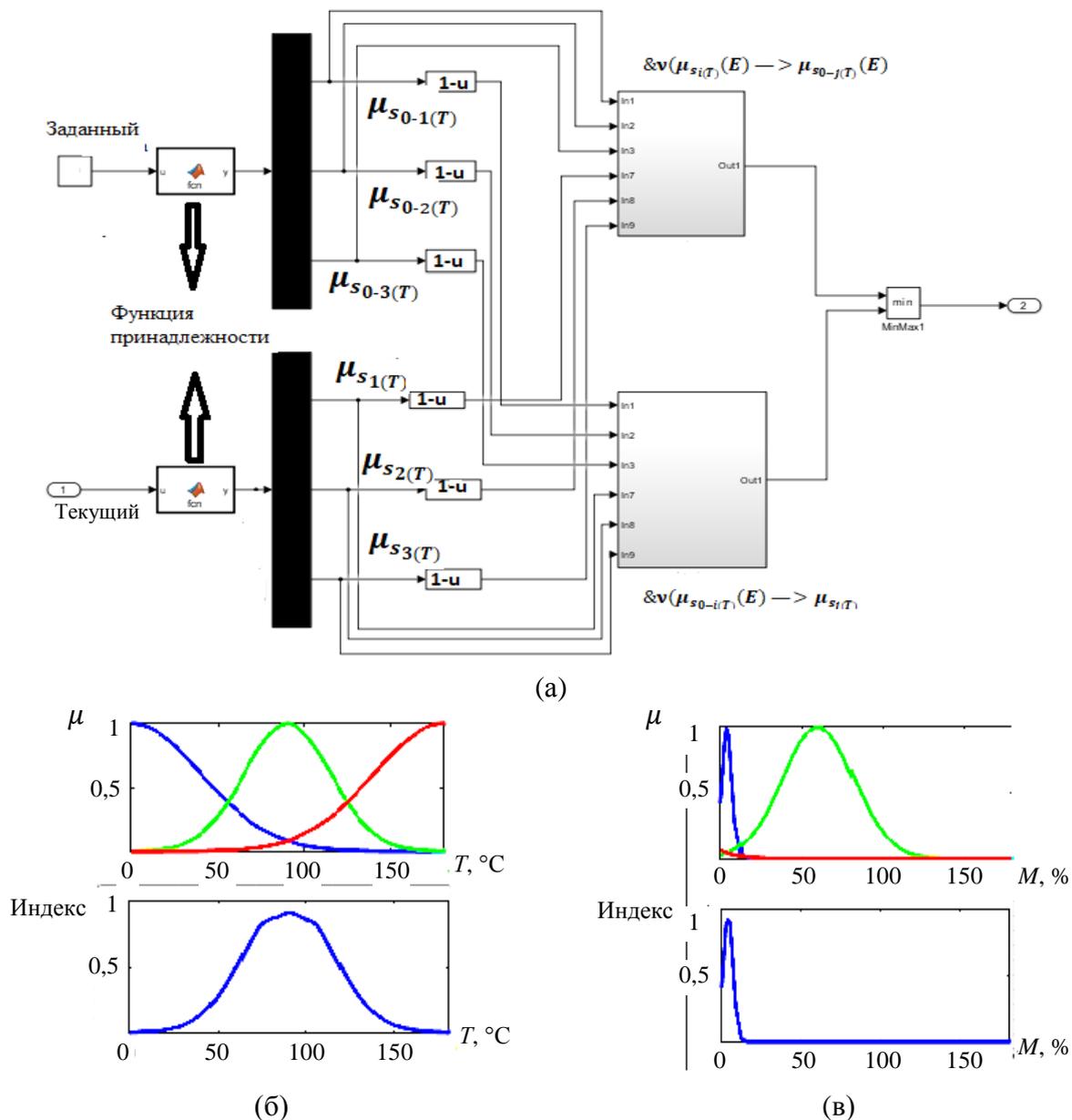


Рис. 7. Блок вычисления технологического индекса качества: блок формирования индекса (а) и результат процесса формирования по температуре (б); влажности (в)

В блоке регулятора используется алгоритм управления прогнозирующими контроллерами с учетом технологического индекса качества (рис. 8).

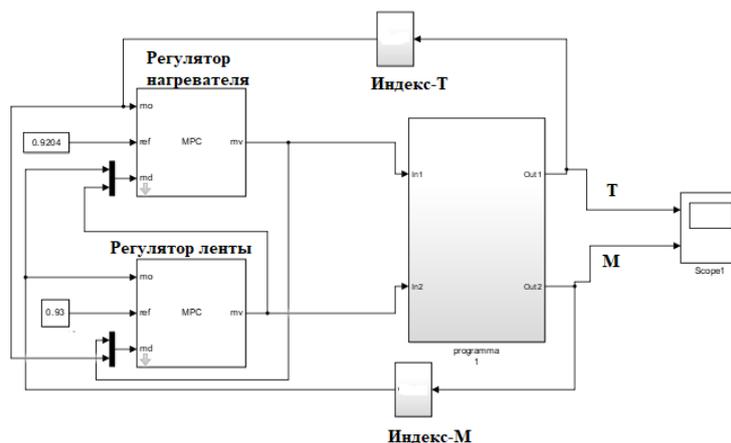


Рис. 8. Блок-схема регулятора обратной связи

КОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ

Основная идея управления с прогнозирующей моделью (УПМ) состоит в том, чтобы предсказать поведение системы и получить ее локально-оптимальное решение. Блок-схема системы УПМ показана на рис. 9. Результатом решения является определение набора управляющих сигналов, соответствующего предсказанным переменным состояния системы в будущем временном периоде.



Рис. 9. Блок-схема системы УПМ:

x_1 и x_2 – прошлые и прогнозируемые входные данные соответственно;
 y – выходной прогнозирующий управляющий сигнал;
 d – желаемый выходной сигнал

Алгоритм системы прогнозирующего управления:

- шаг 1: определить входные параметры объекта управления и ограничить область прогноза;
- шаг 2: задать начальный набор значений;
- шаг 3: построить и рассчитать модель прогнозирующего управления общего вида;
- шаг 4: минимизировать целевую функцию J ;
- шаг 5: определить матрицу приращений управляющего сигнала Δu ;
- шаг 6: выбрать первую составляющую $\Delta u(k|k)$ матрицы приращений управляющего сигнала Δu ;
- шаг 7: найти следующий закон управления процессом, который представляет собой сумму $\Delta u(k|k)$ и $u(k-1)$.

Модель управления в пространстве состояний системы выводит уравнения, которые предсказывают модель в пространстве состояний [9]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t); \\ y(t) = Cx(t), \end{cases} \quad (12)$$

где $x(t)$ – переменная состояния системы; $u(t)$ – управляющая входная переменная; $y(t)$ – выходная переменная системы; A, B, C – матрицы коэффициентов

Из формулы (12) получим

$$\begin{cases} \Delta x(k+1) = A\Delta x(k) + B\Delta u(k); \\ y(k) = C\Delta x(k) + y(k-1), \end{cases}$$

где

$$\begin{cases} \Delta x(k) = x(k) - x(k-1); \\ \Delta u(k) = u(k) - u(k-1). \end{cases}$$

В системе управления предсказывается p шагов вперед, временная область управления контроллера равна c и $p > c$. Если значение p относительно мало, переменное состояние может не отреагировать на внезапные изменения опорного входа. Если значение p относительно велико, реакция системы на возмущения замедляется. В данной статье количество прогнозируемых шагов принимается равным 10, а количество шагов управления – 2. Система прогнозирует инкрементное значение p шагов в момент времени k следующим образом:

$$\begin{cases} \Delta x(k+1|k) = A\Delta x(k) + B\Delta u(k); \\ \Delta x(k+2|k) = A\Delta x(k+1) + B\Delta u(k+1) = A^2\Delta x(k) + AB\Delta u(k) + B\Delta u(k+1); \\ \Delta x(k+3|k) = A^3\Delta x(k) + A^2B\Delta u(k) + AB\Delta u(k+1) + B\Delta u(k+2); \\ \vdots \\ \Delta x(k+p|k) = A^p\Delta x(k) + A^{p-1}B\Delta u(k) + A^{p-2}B\Delta u(k+1) + \dots + A^{p-c}B\Delta u(k+c-1), \end{cases}$$

а также

$$\begin{cases} y(k+1|k) = C\Delta x(k+1|k) + y(k) = CA\Delta x(k) + CB\Delta u(k) + y(k); \\ y(k+2|k) = (CA^2 + CA)\Delta x(k) + (CAB + CB)\Delta u(k) + CB\Delta u(k+1) + y(k); \\ \vdots \\ y(k+p|k) = \sum_{i=1}^p CA^i \Delta x(k) + \sum_{i=1}^p CA^{i-1} B\Delta u(k) + \\ + \sum_{i=1}^{p-1} CA^{i-1} B\Delta u(k+1) + \dots + \sum_{i=1}^{p-c+1} CA^{i-1} B\Delta u(k+c-1) + y(k). \end{cases}$$

Кроме того, можно записать

$$Y(k+1|k) = \alpha\Delta x(k) + \beta\Delta U(k) + \gamma y(k),$$

где

$$Y(k+1|k) = \begin{bmatrix} y(k+1|k) \\ \vdots \\ y(k+p|k) \end{bmatrix}, \gamma = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$\Delta U(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \vdots \\ \Delta u(k+c-1) \end{bmatrix}, \alpha = \begin{bmatrix} CA \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^p CA^i \end{bmatrix}.$$

Целевую функцию в уравнении можно выразить как

$$J(x(t), \Delta U(k), c, p) = \|\mu_1(Y(k+1|k)) - R(k+1)\|^2 + \|\mu_2\Delta U\|^2,$$

где μ_1, μ_2 – веса регуляризации; R – заданные значения.

Таким образом, оптимизационная задача предиктивного управления может быть выражена с помощью формул:

$$\begin{aligned} & \text{Min}(J(x(t), \Delta U(k), c, p)); \\ & \frac{\partial(J(x(t), \Delta U(k), c, p))}{\partial(\Delta U(k))} = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Тогда локально-оптимальное решение в k -й момент может быть получено следующим образом:

$$\Delta U(k) = (\beta^T \mu_1^T \mu_1 + \mu_2^T \mu_2)^{-1} \beta^T \mu_1^T \mu_1 (R(k+1) - \alpha \Delta x(k) - \gamma u(k)).$$

Поскольку вычисление формулы является локально-оптимальным решением системы, полученным в разомкнутом состоянии в момент времени k , сама система будет нарушена многими неопределенными факторами. Следовательно, полученное решение не может удовлетворять требованиям хорошего отслеживания целевой кривой. Система должна вводить обратную связь. Тогда управляющие воздействия в реальном времени могут быть определены как

$$\Delta u(k) = [1 \ 0 \ \dots \ 0] \Delta U(k).$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим результаты внедрения УПМ-регулятора технологического индекса качества при нечетком взаимодействии температуры поверхности слоя зеленого чая с влажностью чайных листьев (рис. 10).

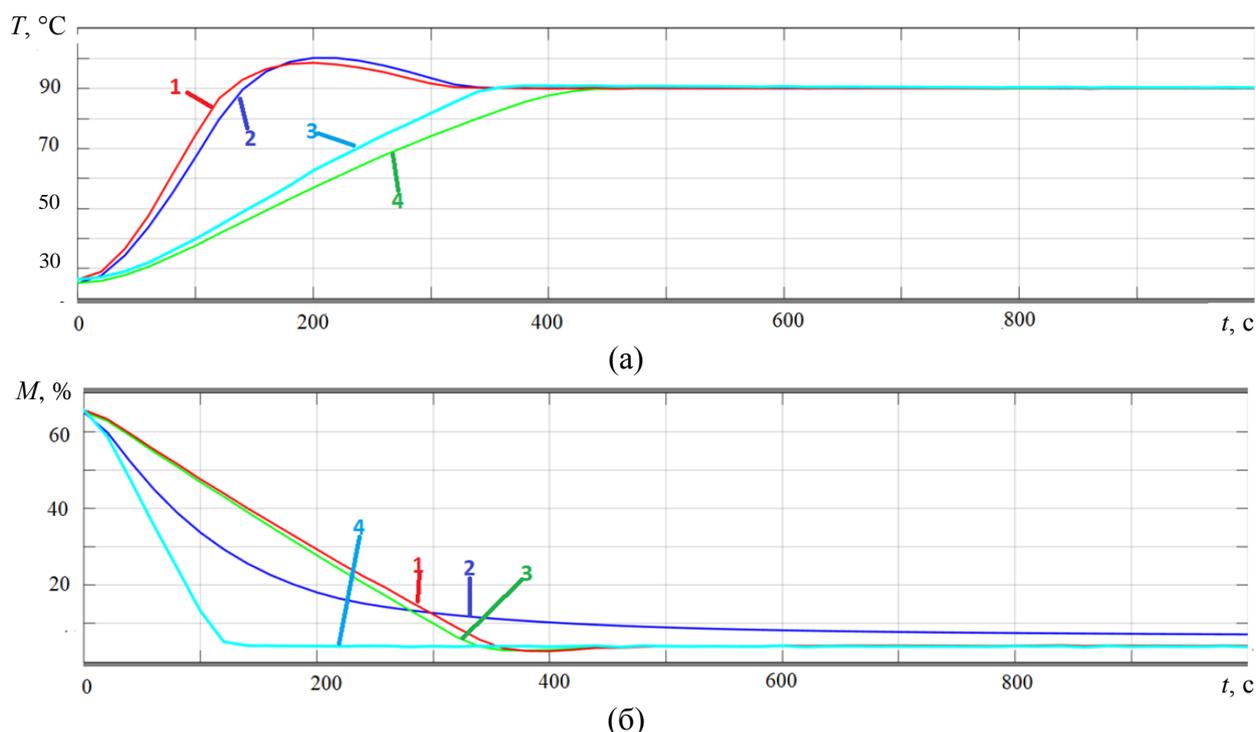


Рис. 10. Результаты моделирования различных регуляторов: температура слоя чая (а); влажность (б); 1 – регулятор без технологического индекса качества при нечетком взаимодействии температуры и влажности; 2 – регулятор без технологического индекса качества при четком взаимодействии температуры и влажности; 3 – регулятор технологического индекса качества при нечетком взаимодействии температуры и влажности; 4 – регулятор технологического индекса качества при четком взаимодействии температуры и влажности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам моделирования можно сделать выводы:

1. При применении технологического индекса качества к модели управления результаты контроля более стабильны и точны.

2. При использовании обратной нечеткой зависимости между температурой и влажностью процесса сушки зеленого чая время стабилизации процесса сокращается.

Результаты численного моделирования показывают, что УПИМ-контроллер с учетом технологического индекса качества работает стабильно и эффективно в условиях устранения входных шумов. Система обеспечивает относительно быстрое реагирование с точки зрения комплексного устранения ошибок и устойчивого состояния при сушке.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Лемпого Ф. Моделирование и управление технологическим процессом термообработки какао-бобов. Дисс... канд. техн. наук. Тверь. 2015. 174 с.

2. Комиссаров Ю.А., Гордеев Л.С., Вент Д.П. Процессы и аппараты химической технологии / под ред. Ю.А. Комиссарова. М.: Химия. 2011. 1239 с.

3. Пучков М.Н. Среда автоматизированного моделирования сушильных аппаратов. Дисс... канд. техн. наук. Москва. 2002. 198 с.

4. Лыков А.В. Тепломассообмен: справочник. М.: Энергия. 1978. 479 с.

5. Vajta M. Nyquist stability test for a parabolic partial differential equation // *IASTED Conf. on Modeling, Identification and Control*. Innsbruck. 2000. P. 296–299.

6. Vajta M. Stability test for a parabolic partial differential equation // *9th Mediterranean Conference on Control and Automation*. Zagreb: KoREMA Secretariat. 2001. P. 151.

7. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети: учебное пособие. М.: Физматлит. 2001. 224 с.

8. Тоичкин Н.А. Диагностика состояний и управление технологической безопасностью с использованием индекса безопасности (на примере цеха выпарки производства хлора и каустика). Дисс... канд. техн. наук. Апатиты. 2006. 215 с.

9. Киселева М.Ю., Смагин В.И. Управление с прогнозирующей моделью с учетом запаздывания по управлению // *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*. 2010. № 2 (11). С. 5–12.

10. Las Koop, Loyse Tussolini A dynamic two-dimensional model for deep-bed drying of mate leaves (*Plex paraguariensis*) in a single-pass/single-zone conveyor-belt dryer // *Drying Technology*. 2015. V. 33. № 2. P. 185–193.

Для цитирования: Фам К.Б., Мурашев П.М., Богатилов В.Н. Прогнозирующее управление индексом качества процесса сушки зеленого чая // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 4 (16). С. 63–76.

PREDICTIVE CONTROL OF THE QUALITY INDEX OF THE GREEN TEA DRYING PROCESS

K.B. FAM, Postgraduate, P.M. MURASHEV, Postgraduate,
V.N. BOGATIKOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: phambang79520897405@gmail.com

This paper describes the design, modeling and implementation of an automatic control system based on predictive control, taking into account the technological quality index for controlling air temperature and conveyor belt speed in a green tea dryer chamber with a fuzzy interaction between the surface temperature of the green tea layer and the moisture content of tea leaves. This automatic control system simulation was carried out using MatLab and Simulink. The results of numerical simulation show that the predictive control based on the technology quality index is stable and reliable in terms of suppression of input noise, and compared with the conventional multi-loop PID controller, the control system based on the technology quality index results in a significant improvement in the performance and control of the drying process.

Keywords: green tea drying, predictive control, automated control system simulation, conveyor belt dryer, technological quality index.

Поступила в редакцию/received: 03.07.2022; после рецензирования/revised: 24.07.2022;
принята/accepted: 01.09.2022

УДК 681.518.3

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ВЛАЖНОСТНЫХ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРЕ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

А.В. КАЙЧЕНОВ¹, канд. техн. наук, В.В. ЕРЕЩЕНКО¹, ст. препод.,
В.В. ЯЦЕНКО¹, канд. техн. наук, И.Г. БЛАГОВЕЩЕНСКИЙ², д-р техн. наук

¹Мурманский государственный технический университет,
183010, Мурманск, Спортивная ул., 13, e-mail: kaychenovav@mstu.edu.ru

²Московский государственный университет пищевых производств,
125080, Москва, Волоколамское ш., 11, e-mail: igblagov@mgupp.ru

© Кайченнов А.В., Ерещенко В.В., Яценко В.В., Благовещенский И.Г., 2022

Рассмотрена математическая модель, описывающая динамические свойства камеры обезвоживания малогабаритной сушильной установки для поиска оптимальных технологических режимов УПОР-М. Математическая модель определяет связь температуры и влагосодержания приточного воздуха и сушильного агента внутри камеры обезвоживания. Приведены описание экспериментальной части исследований и результаты сравнения теоретических и экспериментальных данных.

Ключевые слова: сушильная камера, математическая модель, процессы обезвоживания, экспериментальная модель.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-4-76-87

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 4 (16), 2022*

ВВЕДЕНИЕ

В производстве различной пищевой, в том числе сушеной, продукции этап удаления влаги, как правило, является наиболее энергоемким. Для понимания изменений, происходящих в процессе сушки, оптимизации режимов функционирования сушильной камеры с целью предотвращения нежелательных потерь качества требуется детальное изучение рабочих процессов. Это возможно путем математического моделирования, которое должно учитывать особенности конструкции камеры сушки и условия тепло- и массопереноса.

Разработка и применение математической модели позволят исследовать динамику процесса сушки, разработать пути оптимизации производительности сушильной камеры с точки зрения энергопотребления, повысить эффективность и качество продукции при экономии временных и финансовых затрат. Вопросам математического моделирования систем управления процессом обезвоживания сырья исследователи уделяют большое внимание [1–3]. Часть работ посвящена численному моделированию процессов сушки, в том числе с использованием нейронных сетей [4–6]. Ряд исследователей занимаются вопросами развязки контуров управления температурой и влажностью в промышленных установках [7, 8]. Разработка математических моделей процессов обезвоживания сырья является актуальной задачей. Решение этой задачи сопряжено с получением теоретических и экспериментальных моделей процесса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является камера малогабаритной сушильной установки для поиска оптимальных технологических режимов УПОР-М [9]. Камера имеет малые размеры по сравнению с промышленными установками (0,4 × 0,4 × 0,6 м), теплоизолированный корпус, низкое потребление электроэнергии по сравнению с промышленными установками, регулируемую скорость потока сушильного агента в диапазоне от 0 до 2,5 м/с, систему рециркуляции теплоносителя, управление температурой, контроль относительной влажности входящего воздуха и циркулирующего теплоносителя в установке, средства учета затрат электроэнергии, возможность сбора и архивации параметров технологического процесса.

Математическая модель камеры сушки как объекта регулирования по каналам температуры и относительной влажности должна описывать связи параметров по каналам: температура приточного воздуха ($T_{\text{прит}}$) – температура воздуха в камере ($T_{\text{кам}}$); влагосодержание приточного воздуха ($d_{\text{прит}}$) – влагосодержание воздуха в камере ($d_{\text{кам}}$).

При выводе математической модели, описывающей динамические свойства камеры, использованы уравнения тепловлажностного баланса. В настоящей работе не рассматривались члены уравнения с пренебрежимо малым взаимодействием в общем балансе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Получение теоретической модели камеры сушки. По каналу «температура приточного воздуха – температура воздуха в камере» использовали уравнение теплового баланса для камеры. Камеру обезвоживания рассматривали как объект с сосредоточенными параметрами.

$$M_{\text{возд. кам}} \cdot c_{\text{возд}} \cdot \frac{dT_{\text{кам}}}{dt} = G_{\text{прит}} \cdot c_{\text{возд}} \cdot (T_{\text{прит}} - T_{\text{кам}}) + Q_{\text{изб}}, \quad (1)$$

где $M_{\text{возд. кам}}$ – масса воздуха в камере, кг; $c_{\text{возд}}$ – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг · °С); $G_{\text{прит}}$ – расход приточного воздуха, кг/с; $T_{\text{кам}}$ – температура воздуха в

камере, °С; $T_{\text{прит}}$ – температура приточного воздуха, °С; $Q_{\text{изб}}$ – общие теплоизбытки в камере, кДж/с.

Теплоизбытки в камере из уравнения (1)

$$Q_{\text{изб}} = Q_{\text{огр}} + Q_{\text{вн}} + Q_{\text{инф}}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{огр}}$ – суммарные теплопритоки через ограждения, кДж/с; $Q_{\text{вн}}$ – суммарные внутренние теплопритоки, кДж/с; $Q_{\text{инф}}$ – тепло, вносимое воздухом при инфильтрации, кДж/с.

Суммарные притоки через ограждения

$$Q_{\text{огр}} = \frac{F_{\text{огр}}}{R_{\text{огр}}} \cdot (T_{\text{кам}} - T_{\text{нар}}), \quad (3)$$

где $F_{\text{огр}}$ – площадь ограждающей конструкции, м²; $R_{\text{огр}}$ – сопротивление теплопередаче конструкции ограждения, м² · °С · с/кДж; $T_{\text{кам}}$ – температура воздуха в камере, °С; $T_{\text{нар}}$ – температура наружного воздуха, °С.

Величина сопротивления теплопередаче многослойного ограждения

$$R_{\text{огр}} = R_{\text{вн}} + R_{\text{сл}} + R_{\text{нар}}, \quad (4)$$

где $R_{\text{вн}}$ – сопротивление теплопереходу у внутренней поверхности ограждения, м² · °С · с/кДж; $R_{\text{сл}}$ – суммарное термическое сопротивление отдельных слоев ограждения, м² · °С · с/кДж; $R_{\text{нар}}$ – сопротивление теплопереходу у наружной поверхности ограждения, м² · °С · с/кДж.

Суммарные внутренние теплопритоки в камере из уравнения (2)

$$Q_{\text{вн}} = Q_{\text{сыр}}, \quad (5)$$

где $Q_{\text{сыр}}$ – теплоприток от сырья, кДж/с.

Теплоприток от продукта

$$Q_{\text{сыр}} = M_{\text{сыр}} \cdot c_{\text{сыр}} \cdot (T_{\text{сыр}} - T_{\text{кам}}), \quad (6)$$

где $M_{\text{сыр}}$ – масса сырья в камере, кг; $c_{\text{сыр}}$ – удельная теплоемкость сырья, кДж/(кг · °С); $T_{\text{сыр}}$ – температура сырья, °С; $T_{\text{кам}}$ – температура в камере, °С.

Тепло, вносимое воздухом при инфильтрации:

$$Q_{\text{инф}} = G_{\text{инф}} \cdot c_{\text{возд}} \cdot (T_{\text{нар}} - T_{\text{кам}}), \quad (7)$$

где $G_{\text{инф}}$ – расход инфильтрационного воздуха, кг/с; $c_{\text{возд}}$ – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг · °С); $T_{\text{нар}}$ – температура наружного воздуха, °С; $T_{\text{кам}}$ – температура воздуха в камере, °С.

С учетом формул (2)–(7) уравнение (1) принимает вид

$$\begin{aligned} M_{\text{возд. кам}} \cdot c_{\text{возд}} \cdot \frac{dT_{\text{кам}}}{dt} = & G_{\text{прит}} \cdot c_{\text{возд}} \cdot (T_{\text{прит}} - T_{\text{кам}}) + \\ & + \frac{F_{\text{огр}}}{R_{\text{огр}}} \cdot (T_{\text{кам}} - T_{\text{нар}}) + M_{\text{сыр}} \cdot c_{\text{сыр}} \cdot (T_{\text{сыр}} - T_{\text{кам}}) + \\ & + G_{\text{инф}} \cdot c_{\text{возд}} \cdot (T_{\text{нар}} - T_{\text{кам}}). \end{aligned} \quad (8)$$

После преобразований уравнение (8) выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} & \frac{M_{\text{возд. кам}} \cdot c_{\text{возд}}}{G_{\text{прит}} \cdot c_{\text{возд}} - \frac{F_{\text{огр}}}{R_{\text{огр}}} + M_{\text{сыр}} \cdot c_{\text{сыр}} + G_{\text{инф}} \cdot c_{\text{возд}}} \cdot \frac{dT_{\text{кам}}}{d\tau} + T_{\text{кам}} = \\ & = \frac{G_{\text{прит}} \cdot c_{\text{возд}}}{G_{\text{прит}} \cdot c_{\text{возд}} - \frac{F_{\text{огр}}}{R_{\text{огр}}} + M_{\text{сыр}} \cdot c_{\text{сыр}} + G_{\text{инф}} \cdot c_{\text{возд}}} \cdot T_{\text{прит}} + \\ & + \frac{M_{\text{сыр}} \cdot c_{\text{сыр}}}{G_{\text{прит}} \cdot c_{\text{возд}} - \frac{F_{\text{огр}}}{R_{\text{огр}}} + M_{\text{сыр}} \cdot c_{\text{сыр}} + G_{\text{инф}} \cdot c_{\text{возд}}} \cdot T_{\text{сыр}} + \\ & + \frac{G_{\text{инф}} \cdot c_{\text{возд}} - \frac{F_{\text{огр}}}{R_{\text{огр}}}}{G_{\text{прит}} \cdot c_{\text{возд}} - \frac{F_{\text{огр}}}{R_{\text{огр}}} + M_{\text{сыр}} \cdot c_{\text{сыр}} + G_{\text{инф}} \cdot c_{\text{возд}}} \cdot T_{\text{нар}}. \end{aligned} \quad (9)$$

При введении обозначений $T_{\text{п. в. кам}}$, $k_{\text{к. п. прит}}$, $k_{\text{к. п. сыр}}$, $k_{\text{к. п. нар}}$ уравнение (9) принимает вид

$$\begin{aligned} T_{\text{п. в. кам}} \cdot \frac{dT_{\text{кам}}}{d\tau} + T_{\text{кам}} = k_{\text{к. п. прит}} \cdot T_{\text{прит}} + \\ + k_{\text{к. п. сыр}} \cdot T_{\text{сыр}} + k_{\text{к. п. нар}} \cdot T_{\text{нар}}, \end{aligned} \quad (10)$$

где $T_{\text{п. в. кам}}$ – постоянная времени камеры; $k_{\text{к. п. прит}}$, $k_{\text{к. п. сыр}}$, $k_{\text{к. п. нар}}$ – коэффициенты передачи по соответствующим каналам.

Применив к уравнению (10) преобразование Лапласа при нулевых начальных условиях, получим передаточную функцию камеры по регулируемому воздействию $W_{\text{кам. темп}}(p)$ и передаточную функцию камеры по возмущающим воздействиям $W_{\text{кам. сыр}}(p)$, $W_{\text{кам. нар}}(p)$:

$$W_{\text{кам. темп}}(p) = \frac{k_{\text{к. п. прит}}}{T_{\text{п. в. кам}} p + 1}; \quad (11)$$

$$W_{\text{кам. нар}}(p) = \frac{k_{\text{к. п. нар}}}{T_{\text{п. в. кам}} p + 1}; \quad (12)$$

$$W_{\text{кам. сыр}}(p) = \frac{k_{\text{к. п. сыр}}}{T_{\text{п. в. кам}} p + 1}. \quad (13)$$

После подстановки числовых значений в уравнения (11)–(13) получим теоретические передаточные функции для незагруженной продуктом камеры:

$$W_{\text{кам. темп}}(p) = \frac{1,023}{1\,666,48p + 1};$$

$$W_{\text{кам. нар}}(p) = \frac{-0,023}{1\,666,48p + 1};$$

$$W_{\text{кам. сыр}}(p) = 0.$$

При выводе уравнения математической модели, описывающего динамические свойства камеры по каналу «влажность воздуха – влажность воздуха в камере», использовалось уравнение материального баланса (баланса влаги) в помещении:

$$M_{\text{возд. кам}} \cdot \frac{d(d_{\text{кам}})}{d\tau} = G_{\text{прит}} \cdot (d_{\text{прит}} - d_{\text{кам}}) + G_{\text{инф}} \cdot (d_{\text{нар}} - d_{\text{кам}}) + G_{\text{увл}} \cdot (d_{\text{увл}} - d_{\text{кам}}) + W, \quad (14)$$

где $M_{\text{возд. кам}}$ – масса воздуха в камере, кг; $G_{\text{прит}}$ – расход приточного воздуха, кг/с; $G_{\text{инф}}$ – расход инфильтрующегося воздуха, кг/с; $G_{\text{увл}}$ – расход воздуха через увлажнитель, кг/с; $d_{\text{прит}}$ – влагосодержание приточного воздуха, г/кг; $d_{\text{кам}}$ – влагосодержание воздуха в камере, г/кг; $d_{\text{нар}}$ – влагосодержание инфильтрующегося воздуха, г/кг; $d_{\text{увл}}$ – влагосодержание воздуха после увлажнителя, г/кг; W – суммарный прирост влажности, г/с.

Суммарный прирост влажности

$$W = 833 \cdot (W_{\text{сыр}} + W_{\text{др}}) = 833 \cdot W', \quad (15)$$

где 833 – коэффициент, который учитывает плотность воздуха и другие величины; $W_{\text{сыр}}$ – прирост влажности в камере от сырья, г/с; $W_{\text{др}}$ – прирост влажности в камере от других факторов, г/с; W' – сумма приростов влажности, г/с.

После преобразований, а также с учетом формулы (15) уравнение (14) принимает вид

$$\begin{aligned} & \frac{M_{\text{возд. кам}}}{(G_{\text{прит}} + G_{\text{инф}} + G_{\text{увл}})} \cdot \frac{d(d_{\text{кам}})}{d\tau} + d_{\text{кам}} = \\ & = \frac{G_{\text{прит}}}{(G_{\text{прит}} + G_{\text{инф}} + G_{\text{увл}})} \cdot d_{\text{прит}} + \frac{G_{\text{инф}}}{(G_{\text{прит}} + G_{\text{инф}} + G_{\text{увл}})} \cdot d_{\text{нар}} + \\ & + \frac{G_{\text{увл}}}{(G_{\text{прит}} + G_{\text{инф}} + G_{\text{увл}})} \cdot d_{\text{увл}} + \frac{833 \cdot W'}{(G_{\text{прит}} + G_{\text{инф}} + G_{\text{увл}})}. \end{aligned} \quad (16)$$

При введении обозначений $T_{\text{п. в. кам. } d}$, $k_{\text{к. п. прит. } d}$, $k_{\text{к. п. нар. } d}$, $k_{\text{к. п. увл. } d}$, $k_{\text{к. п. прирост. } d}$ уравнение (16) преобразуется в формулу

$$\begin{aligned} & T_{\text{п. в. кам. } d} \cdot \frac{d(d_{\text{кам}})}{d\tau} + d_{\text{кам}} = \\ & = k_{\text{к. п. прит. } d} \cdot d_{\text{прит}} + k_{\text{к. п. нар. } d} \cdot d_{\text{нар}} + k_{\text{к. п. увл. } d} \cdot d_{\text{увл}} + \\ & + k_{\text{к. п. прирост. } d} \cdot W', \end{aligned} \quad (17)$$

где $T_{\text{п. в. кам. } d}$ – постоянная времени камеры; $k_{\text{к. п. прит. } d}$, $k_{\text{к. п. нар. } d}$, $k_{\text{к. п. прирост. } d}$ – коэффициенты передачи по соответствующим каналам.

Применив к уравнению (17) преобразование Лапласа при нулевых начальных условиях, получим передаточные функции камеры по регулируемому воздействию $W_{\text{кам. темп. } d}(p)$, $W_{\text{кам. прирост. } d}(p)$; передаточную функцию камеры по возмущающему воздействию $W_{\text{кам. нар. } d}(p)$:

$$W_{\text{кам. темп. } d}(p) = \frac{k_{\text{к. п. прит. } d}}{T_{\text{п. в. кам. } d} p + 1}; \quad (18)$$

$$W_{\text{кам. нар. } d}(p) = \frac{k_{\text{к. п. нар. } d}}{T_{\text{п. в. кам. } d} p + 1}; \quad (19)$$

$$W_{\text{кам. увл. } d}(p) = \frac{k_{\text{к. п. увл. } d}}{T_{\text{п. в. кам. } d} p + 1}; \quad (20)$$

$$W_{\text{кам. прирост. } d}(p) = \frac{W_{\text{кам. прирост. } d}}{T_{\text{п. в. кам. } d} p + 1}. \quad (21)$$

После подстановки числовых значений в уравнения (18)–(21) получили теоретические передаточные функции для незагруженной продуктом камеры:

$$W_{\text{кам. темп. } d}(p) = \frac{0,091}{167,21p + 1};$$

$$W_{\text{кам. нар. } d}(p) = \frac{0,00015}{167,21p + 1};$$

$$W_{\text{кам. увл. } d}(p) = \frac{0,91}{167,21p + 1};$$

$$W_{\text{кам. прирост. } d}(p) = 0.$$

Из теории тепловлажностной обработки воздуха известно, что температура ограничивает максимальное влагосодержание, а при адиабатическом увлажнении увеличение влагосодержания оказывает влияние на температуру, понижая ее. Учтем эти каналы, введя передаточные функции $W_{\text{св.1}}(p)$ и $W_{\text{св.2}}(p)$. Коэффициенты передачи этих передаточных функций находятся из уравнений взаимосвязи параметров влажного воздуха.

С учетом полученных передаточных функций (11)–(13), (18)–(21) и введенных взаимосвязей контуров $W_{\text{св.1}}(p)$ и $W_{\text{св.2}}(p)$ структурная схема камеры сушки как объекта регулирования будет иметь вид, показанный на рис. 1.

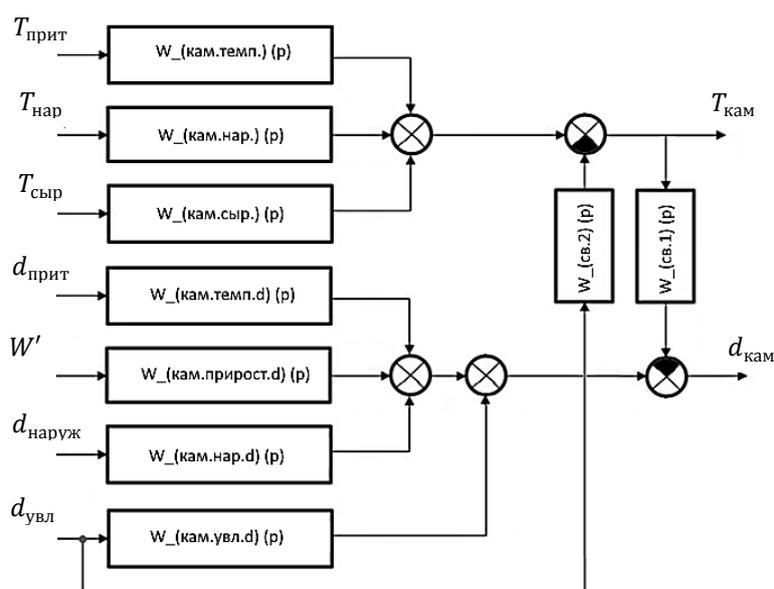


Рис. 1. Структурная схема камеры сушки как объекта регулирования

Получение экспериментальной модели камеры сушки. С учетом теоретической модели камеры сушки в данном исследовании создана экспериментальная модель и проведено сравнение теоретических и экспериментальных данных.

Экспериментальная модель получена на основе результатов проведенных экспериментов с одним входом и выходом и несколькими входами и выходами в одной секции камеры установки УПОР-М:

- 1) эксперимента для изучения внутренней температуры;
- 2) эксперимента для изучения внутреннего влагосодержания;
- 3) эксперимента для изучения связи внутренней температуры и влагосодержания.

Коэффициенты передаточных функций получены из экспериментальных данных с использованием программного продукта AutoCont Lite: SeekerC [10].

Эксперимент для изучения внутренней температуры. Параметры передаточной функции по изменению температуры в камере установки УПОР-М получены из эксперимента при исходных значениях температуры и влагосодержания 18,61 °С и 4,2 г/кг соответственно. На рис. 2 показан вид переходного процесса эксперимента (оранжевым цветом) и модели (зеленым цветом) при входном воздействии (синим цветом). Максимальное отклонение значений модели от экспериментальных данных не превышает 5 %.

Передаточная функция с экспериментально полученными параметрами имеет вид

$$W_{\text{кам. темп}}(p) = \frac{1}{1923,46p + 1}$$

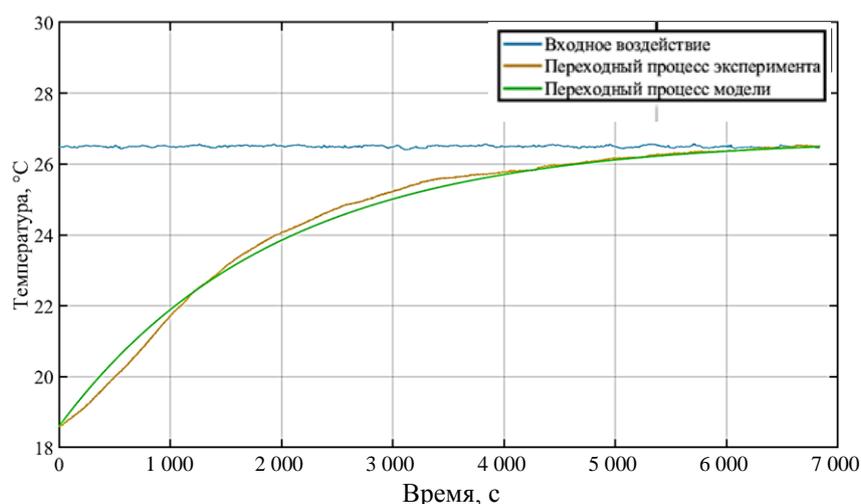


Рис. 2. Графики переходных процессов при определении коэффициентов экспериментальной передаточной функции по температуре

Эксперимент для изучения изменения влагосодержания в камере сушки. Параметры передаточной функции по изменению влагосодержания в камере получены из эксперимента при исходных значениях температуры и влагосодержания 17,5 °С и 3,77 г/кг. На рис. 3 показан вид переходного процесса эксперимента (оранжевым цветом) и модели (зеленым цветом) при входном воздействии (синим цветом). Максимальное отклонение значений модели от экспериментальных данных не превышает 10 %. Передаточная функция с экспериментально полученными параметрами имеет вид

$$W_{\text{кам. темп. d}}(p) = \frac{1}{134,372p + 1}$$

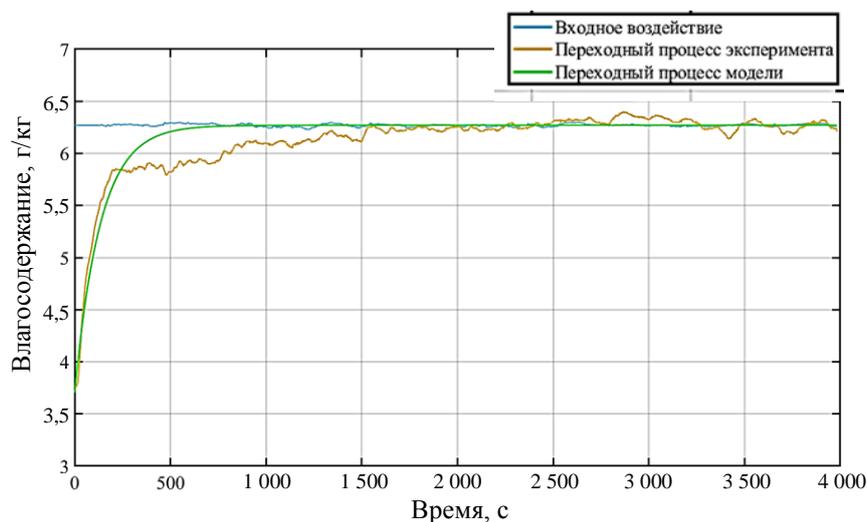


Рис. 3. Графики переходных процессов при определении коэффициентов экспериментальной передаточной функции по влагосодержанию

Эксперимент для изучения связи температуры и влагосодержания в камере сушки. Камера сушки представляет собой многосвязный объект. Зависимость между температурой и влагосодержанием означает, что управление таким объектом может быть сложной задачей, поскольку изменение регулирующего воздействия по одному каналу приводит к изменению в другом.

На рис. 4 представлен переходный процесс при изменении воздействий по исследуемым каналам, показывающий влияние контуров управления друг на друга в камере сушки.

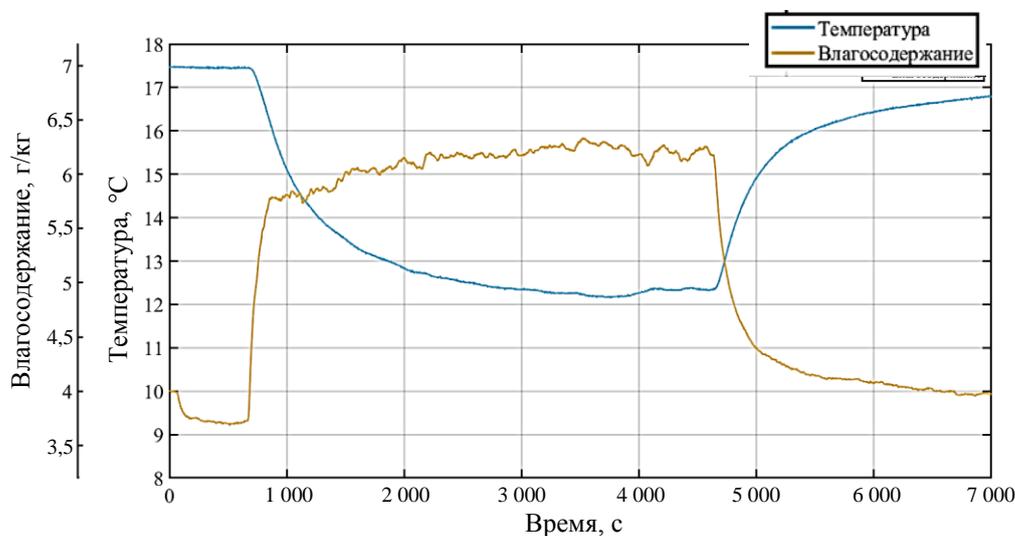


Рис. 4. Переходные процессы при изменении воздействий. Взаимосвязь параметров

Передаточная функция с экспериментально полученными параметрами $W_{св.2}(p)$ по каналу «влагосодержание увлажненного воздуха ($d_{увл}$) – изменение температуры в камере ($T_{увл}$)» получена из эксперимента (рис. 5) и имеет вид

$$W_{св.2}(p) = \frac{2,48}{150,067p + 1}$$

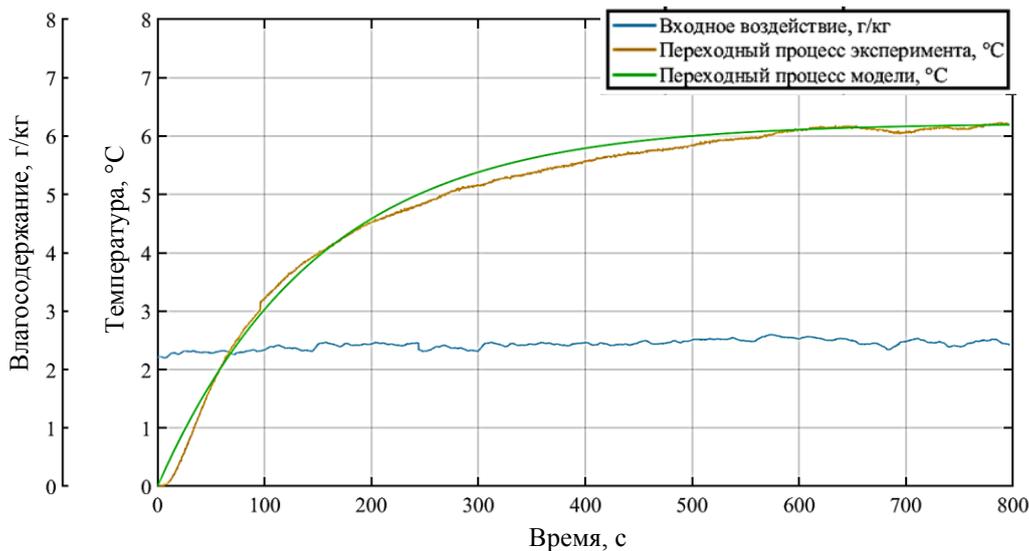


Рис. 5. Графики переходных процессов при определении коэффициентов экспериментальной передаточной функции $W_{св.2}(p)$

Вид переходного процесса эксперимента (показан оранжевым цветом) и модели (показан зеленым цветом) при входном воздействии (показан синим цветом), являющемся функцией от влажосодержания, представлен на рис. 5. Максимальное отклонение значений модели от экспериментальных данных не превышает 8 %.

Сравнение переходных процессов, полученных с применением теоретической и экспериментальной моделей, проведено в среде MatLab в соответствии со структурной схемой, представленной на рис. 6. Сопоставление трех переходных процессов (рис. 7–9) осуществлялось последовательно. На первом этапе происходило моделирование нагрева до температуры 18,5 °С с увеличением влажосодержания до 4 г/кг. На втором этапе (с 10 000-й с) происходил нагрев камеры от 18,5 до 26,5 °С. На третьем (с 20 000-й с) проводилось моделирование увлажнения с изменением влажосодержания от 4 до 6 г/кг (рис. 10).

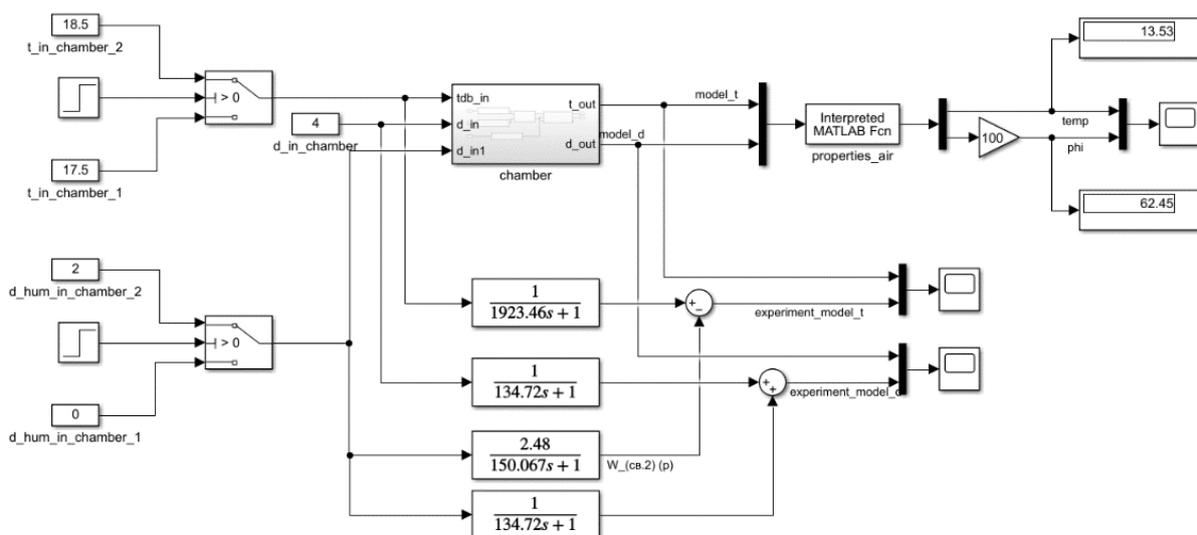


Рис. 6. Структурная схема сравнения переходных процессов, полученных с применением теоретической и экспериментальной модели

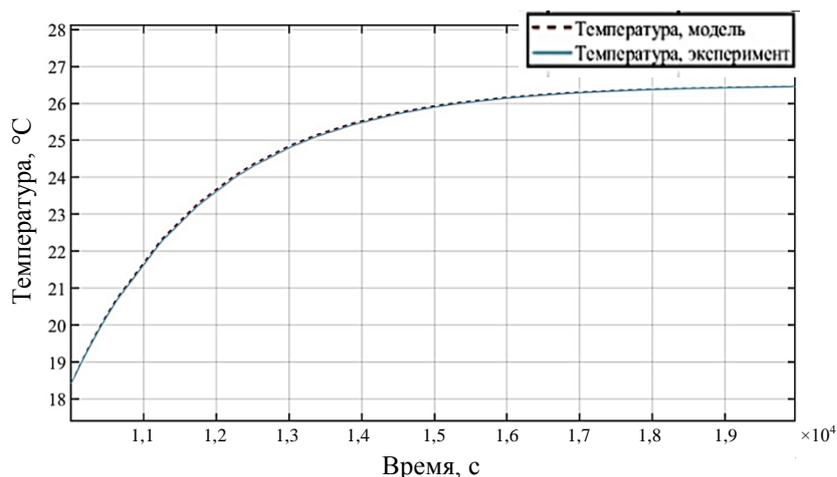


Рис. 7. Результаты сравнения переходных процессов по каналу «температура приточного воздуха ($T_{\text{прит}}$) – температура воздуха в камере ($T_{\text{кам}}$)»

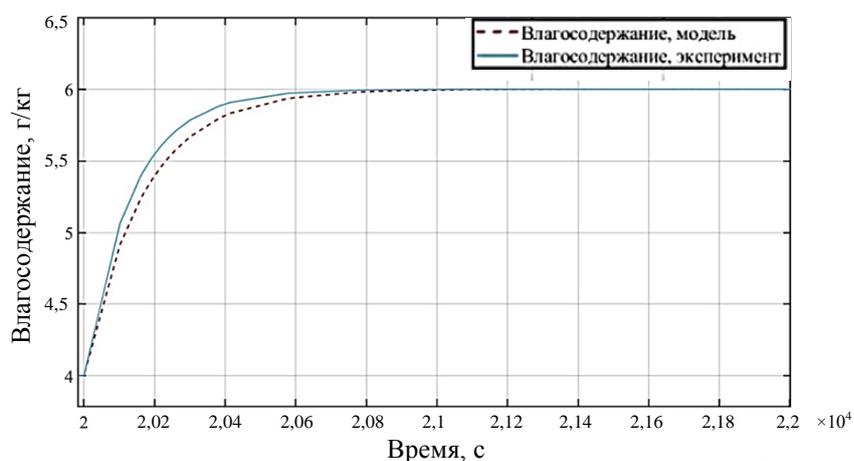


Рис. 8. Результаты сравнения переходных процессов по каналу «влагодержание приточного воздуха ($d_{\text{прит}}$) – влагодержание воздуха в камере ($d_{\text{кам}}$)»

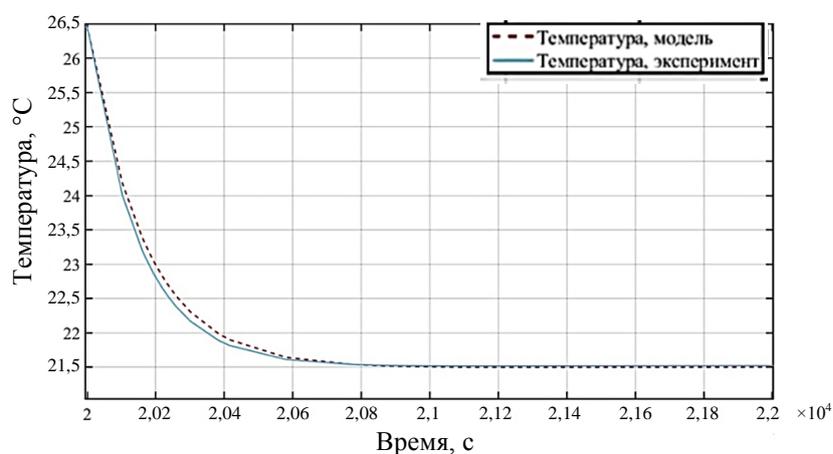


Рис. 9. Результаты сравнения переходных процессов по каналу «влагодержание увлажненного воздуха ($d_{\text{увл}}$) – изменение температуры в камере ($T_{\text{увл}}$)»

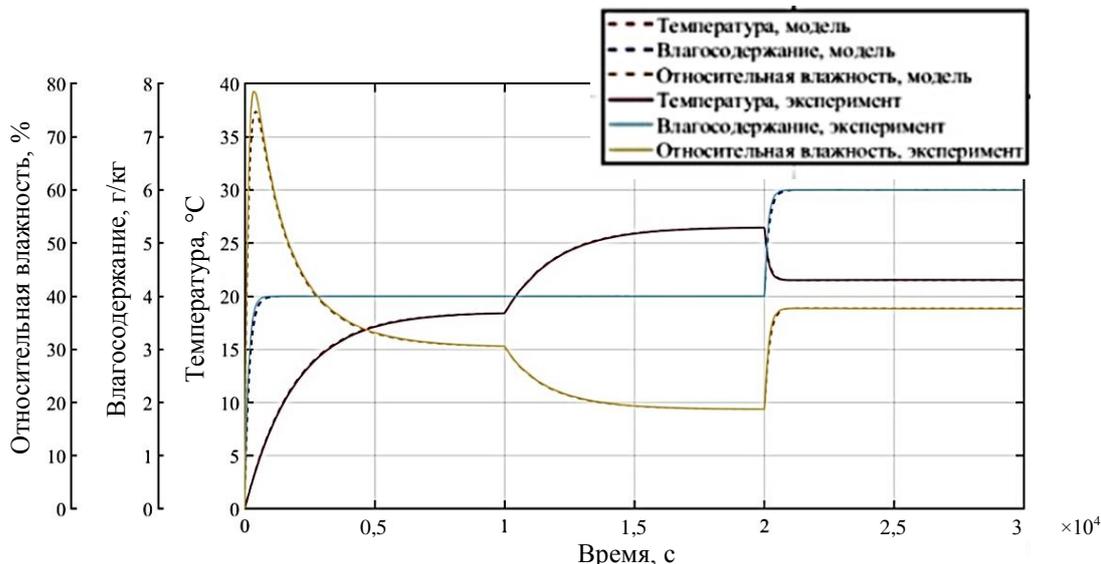


Рис. 10. Графики экспериментального исследования температурных и влажностных процессов

Результаты сравнения графиков переходных процессов теоретической и экспериментальной моделей показали высокую степень близости полученных данных. Максимальное отклонение значений модели от экспериментальных данных не превысило 5 % по температуре и 10 % по влажностности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования говорят о том, что можно проводить численное моделирование тепловлажностных процессов внутри камеры сушки. Синтез регулятора для установки УПОР-М дает возможность получать оптимальные по качеству управления настройки системы. Совмещение результатов моделирования процессов в сушильной камере с моделями обезвоживания сырья способствует получению режимов обезвоживания, оптимальных по затратам энергии и времени. Совокупное моделирование процессов обезвоживания с экспериментально полученными результатами сушки позволяет проводить цифровую сертификацию режимов, чтобы использовать их для промышленных сушильных установок.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-26-20116.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грибков А.Н. Функциональное и информационное моделирование информационно-управляющей системы сушильными установками // *Инженерная физика*. 2009. № 6. С. 36–39.
2. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Яровой И.И., Борщ А.А. Моделирование процессов обезвоживания пищевого сырья в электромагнитном поле // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2013. № 3 (57). С. 62–65.
3. Ершов М.А., Ершов А.М., Лыжин Е.В., Гроховский В.А., Димова Ж.Г. Моделирование процессов обезвоживания провесной и вяленой рыбы // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2021. Т. 83. № 1 (87). С. 55–61.

4. Defraeye T. Advanced computational modelling for drying processes: a review // *Applied Energy*. 2014. V. 131. P. 323–344.

5. Jay S. Assessment of industrial energy utilisation and efficiency of drying systems and the modelling of drying characteristics using neural networks. Birmingham: Aston University. 1998. P. 1357.

6. Kiranoudis C. T., Maroulis Z. B., Marinou-Kouris D. Heat and mass transfer model building in drying with multiresponse data // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1995. V. 38. № 3. P. 463–480.

7. Wang L., Zhu Z. Research on Temperature and humidity decoupling control of constant temperature and humidity test chamber // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2020. V. 711. № 1. P. 012104.

8. Патент РФ 136962 на полезную модель. *Малогабаритная установка для поиска оптимальных технологических режимов сушки сырья* / Селяков И.Ю., Кайченков А.В., Маслов А.А., Ершов М.А., Аминов В.А. Заявл. 13.05.2013. Оpubл. 27.01.2014. Бюл. № 3.

9. Песков Н.П., Нажимова Н.А. Математическое моделирование технологического процесса ректификации этаноламинов // *Математические методы в технике и технологиях – ММТТ*. 2013. № 9-1 (59). С. 183–184.

10. Свидетельство РФ 2020660156 о государственной регистрации программы для ЭВМ. *AutoCont Lite: SeekerC* / Жук А.А. Заявл. 18.08.2020. Оpubл. 28.08.2020. Бюл. № 9.

Для цитирования: Кайченков А.В., Ерещенко В.В., Яценко В.В., Благовещенский И.Г. Математическое моделирование тепловых и влажностных процессов в камере обезвоживания пищевых продуктов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 4 (16). С. 76–87.

MATHEMATICAL MODELING OF THERMAL AND HUMIDITY PROCESSES IN THE FOOD DRYING CHAMBER

A.V. KAYCHENOV¹, Cand. Sc., V.V. ERESHCHENKO¹, Senior Lecturer,
V.V. YATSENKO¹, Cand. Sc., I.G. BLAGOVESHCHENSKY², Dr. Sc.

¹Murmansk State Technical University, 13, Sportivnaya str., 183010, Murmansk,
Russian Federation, e-mail: kaychenovav@mstu.edu.ru

²Moscow State University of Food Production, 11, Volokolamsk Hwy, 125080, Moscow,
Russian Federation, e-mail: igblagov@mgupp.ru

The article considers a mathematical model describing the dynamic properties of the drying chamber of a small-sized drying plant (UPOR-M) for the search for optimal technological regimes. The mathematical model determines the relationship between the temperature and moisture content of the supply air and the drying agent inside the dewatering chamber. The article also describes the experimental part of the research and the results of comparing theoretical and experimental data.

Keywords: drying chamber, mathematical model, dehydration process, experimental model.

Поступила в редакцию/received: 21.07.2022; после рецензирования/revised: 30.08.2022;
принята/accepted: 12.09.2022



**МАТЕРИАЛЫ НАУЧНОГО СЕМИНАРА
«ЗОЛОТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ»*,
посвященного
100-летию со дня рождения выдающегося
русского математика,
академика АН СССР
Евгения Васильевича Золотова**

6–7 октября 2022, Тверь
Тверской государственный технический университет

УДК 681.5

**НАУЧНАЯ ШКОЛА АКАДЕМИКА Е.В. ЗОЛОТОВА
В ЦНИИ ВКС МИНОБОРОНЫ РОССИИ:
ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ, ДОСТИЖЕНИЯ**

М.Л. ЦУРКОВ, канд. техн. наук, Г.А. ЛОПИН, д-р техн. наук

ЦНИИ ВКС Минобороны России,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 32, e-mail: MLTS69@yandex.ru

© Цурков М.Л., Лопин Г.А., 2022

В статье проведен анализ основных итогов научной работы действительного члена Академии наук СССР Евгения Васильевича Золотова. Рассмотрен период с 1942 по 1967 год – время становления ученого и прохождения им военной службы в НИИ-2, ныне ЦНИИ ВКС Минобороны России. Работа посвящена 100-летию со дня рождения исследователя. Представлены основные теоретические разработки Е.В. Золотова как первого доктора наук НИИ-2, особенности научной школы, создаваемой им в институте. Дан анализ предложенной методологии исследований и основ построения в городе Твери (Калинине) стрельбового моделирующего комплекса для экспериментального исследования уязвимости воздушных целей к поражающему действию зенитных управляемых ракет ПВО с неконтактным взрывателем. Показаны основные достижения Е.В. Золотова, направления его исследований и уровень их развития в настоящее время.

Ключевые слова: воздушные цели, зенитные управляемые ракеты, научная школа, противовоздушная оборона, системный анализ, стрельбовый моделирующий комплекс, характеристики уязвимости.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-4-88-97

ВВЕДЕНИЕ

В 2022 году исполняется 100 лет со дня рождения выдающегося советского математика, действительного члена Академии наук СССР Евгения Васильевича Золотова. Многие результаты научной работы будущего академика, первого доктора наук калининского НИИ-2 (ныне ЦНИИ ВКС – Центрального научно-

* Публикация материалов научного семинара будет продолжена в следующих номерах журнала.

исследовательского института Воздушно-космических сил в городе Твери) были получены во время прохождения им военной службы в данном институте. Теоретические разработки Евгения Васильевича были чрезвычайно важны в 60-е годы XX века и не потеряли своей актуальности сегодня для научного обоснования развития зенитного ракетного вооружения системы воздушно-космической обороны (ВКО) на новом научно-техническом уровне. Кроме того, рассматриваемый материал представляет значительный практический интерес для тверского научного кластера ВКО, включающего Военную академию ВКО и университеты, и может быть использован талантливыми студентами, интересующимися военно-научной работой. Таким образом, тема настоящей статьи – научная школа академика Е.В. Золотова в ЦНИИ ВКС Минобороны России, этапы ее создания и достижения – является актуальной.

Цель статьи заключается в том, чтобы на основе анализа публикаций о Е.В. Золотове и новых материалов по направлениям исследований, предложенных ученым, систематизировать теоретические подходы и основные методы, получившие дальнейшее развитие на современном этапе. Известные публикации в открытой печати касались в основном биографических данных и перечня научных достижений ученого в более поздний период его работы в Дальневосточном научном центре. Новизна предложенных материалов заключается в анализе научно-методических аспектов основных результатов исследований Е.В. Золотова в период его военной службы, а также в изучении связи с направлениями работ, ведущихся в настоящее время. Материалы исследований публикуются впервые.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Биография Евгения Васильевича Золотова во многом типична для граждан нашей страны в ту эпоху. Будущий академик родился 29 апреля 1922 года в городе Туле. После окончания средней школы в 1939 году он поступил на механико-математический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, который не окончил в связи с началом Великой Отечественной войны.

В 1942 году талантливый молодой человек был направлен на учебу в Военно-артиллерийскую академию имени Ф.Э. Дзержинского. После окончания академии в 1945 году получил направление в Артиллерийский стрелковый комитет зенитной артиллерии (город Евпатория), позднее в НИИ-2 (город Калинин), ныне ЦНИИ ВКС Минобороны России. С этого времени начался военный период научной деятельности Золотова, посвященный исследованию эффективности стрельбы средствами ПВО по воздушным целям.

Разумеется, в 50-е годы XX века в НИИ-2 такие проблемы, как использование искусственного интеллекта, не рассматривались. Однако, например, тематические направления математического моделирования сложных систем вооружения ПВО и процессов поражения целей, несомненно, являлись актуальными. Это было связано с тем, что после Великой Отечественной войны во многих странах наблюдалось бурное развитие военной авиации и противостоящих им огневых средств ПВО, основу которых составляло управляемое ракетное оружие. Остро встал вопрос об обосновании новых методов оценки эффективности стрельбы таким оружием по воздушным целям и о разработке соответствующих документов.

Работы по совершенствованию теории стрельбы велись развернутым фронтом в научных организациях Войск противовоздушной обороны, Военно-воздушных сил, Военно-морского флота и промышленности. Значительную роль в этом сыграли труды выдающихся советских математиков А.Н. Колмогорова, В.С. Пугачева, Е.С. Вентцель.

Данные исследования получили развитие в работах Е.В. Золотова, Р.С. Саркисяна, Н.П. Бусленко и других ученых.

Недостатки существующих методов оценки эффективности стрельбы отмечал академик А.Н. Колмогоров в работе «Число попаданий при нескольких выстрелах и общие принципы оценки эффективности системы стрельбы». Они состояли в том, что для оценок эффективности стрельбы использовались показатели, которые не были непосредственно связаны с задачей стрельбы. Например, вероятность попадания в цель не менее заданного числа осколков или вероятность попадания в цель $P_{омс}$ хотя бы одного убийного осколка $P_{омс} = GP^1$, математическое ожидание числа N осколков, попавших в цель, $M(N^1) \geq M(N_{треб}^1)$, где индекс «1» относится к одному убийному осколку. Убийным считался осколок, пробивающий стальную плиту определенной толщины.

В решениях научных конференций, проводимых Академией артиллерийских наук в начале 50-х годов XX века, отмечалось, что методы оценки эффективности стрельбы снарядами с ударным взрывателем, предложенные Колмогоровым, доведены до возможности практического применения и накоплен достаточный экспериментальный материал, а для оценки эффективности стрельбы снарядами с неконтактным подрывом окончательно отработанных методов не существует [1].

Анализ результатов испытаний и боевого применения средств ПВО показал, что основу любых количественных оценок эффективности боевых действий формирований ПВО составляют показатели эффективности стрельбы отдельных огневых средств. При этом ключевым показателем эффективности стрельбы является закон поражения цели, прогнозируемый с помощью специальных экспериментально-теоретических методов. Е.В. Золотов совместно с начальником управления зенитного ракетного вооружения Николаем Никитовичем Федотенковым и группой сотрудников института предложил методический подход, реализованный им в трудах и развитый в научных работах по исследованию эффективности стрельбы снарядами с неконтактным подрывом класса «земля – воздух» (рис. 1).

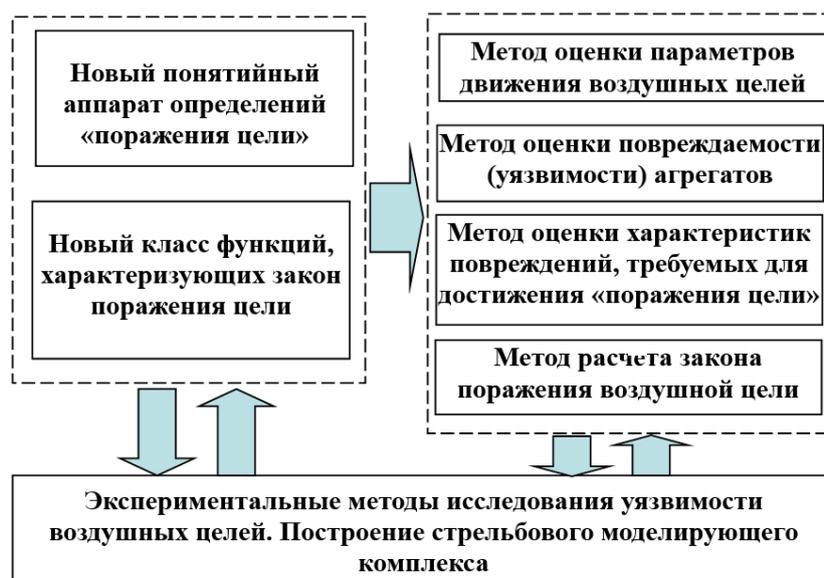


Рис. 1. Методы оценки эффективности стрельбы снарядами с неконтактным подрывом класса «земля – воздух» (середина 50-х годов XX века)

Для определения закона поражения цели было предложено: 1) обосновать понятие «поражение цели» с точки зрения результатов (степени поражения), которых следует добиваться при стрельбе; 2) определить, при каких повреждениях воздушной цели будет достигнут результат стрельбы, соответствующий понятию «поражение цели»; 3) выяснить, какие повреждения могут быть нанесены агрегатам цели при воздействии на них поражающих факторов; 4) выявить класс функций и определить параметры, которыми может быть охарактеризован закон поражения; 5) разработать метод его расчета.

Группой ученых института под руководством Золотова была предложена информационно-описательная модель воздушной цели как объекта поражения, обобщенная структура которой представлена на рис. 2. Было ясно, что применительно к различным классам воздушных целей и уязвимым элементам разработанная структура может упрощаться или усложняться. Ее использование для анализа при построении прогнозной модели воздушной цели как объекта поражения позволяет избежать существенных ошибок.



Рис. 2. Модель воздушной цели как объекта поражения

В 1952 году Евгений Васильевич успешно защитил кандидатскую диссертацию, а в 1962 году – первую в НИИ-2 диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. В докторской диссертации им были разработаны математические методы оценки эффективности стрельбы ракетами класса «земля – воздух» с неконтактными взрывателями и дано обоснование методологии определения характеристик уязвимости воздушных целей к поражающему действию боеприпасов. Под *уязвимостью* Золотов понимал свойство цели, определяющее степень ее чувствительности к воздействию поражающих факторов боеприпасов. В своих работах Евгений Васильевич установил, что уязвим не весь самолет как цель, а только его жизненно важные части, нарушение нормального функционирования или повреждение

которых приводит к поражению самолета в целом. Таким образом, для оценки возможности его поражения воздушную цель условно разбивают на так называемые уязвимые отсеки. Расчеты показали, что физический механизм поражения отсеков существенно зависит от их свойств и может быть, например, иницирующим (при поражении боевой нагрузки самолета) или зажигательным (при воздействии на топливные баки и т.д.).

Своими теоретическими трудами и практической деятельностью Евгений Васильевич внес значительный вклад в обоснование построения систем вооружения – то, что в настоящее время относится к области программно-целевого планирования вооружения. Научные разработки Золотова были чрезвычайно актуальны и легли в основу принципиально нового в то время вооружения – зенитных управляемых ракет различной дальности и назначения.

В 1957 году в составе НИИ-2 был образован научно-исследовательский отдел уязвимости средств воздушно-космического нападения (СВКН) к поражающему действию боеприпасов, первым начальником которого стал Е.В. Золотов. Перед личным составом научно-исследовательского отдела, возглавляемого Евгением Васильевичем, стояли задачи по разработке характеристик уязвимости воздушных целей, а также методического аппарата оценки эффективности поражающего действия боеприпасов ПВО по воздушным целям. Отдел участвовал и в разработке рекомендаций по повышению боевой живучести отечественной авиационной техники, увеличению эффективности поражающего действия отечественных боеприпасов.

Под руководством Золотова в НИИ-2 был сформирован Межведомственный научно-координационный совет для разработки исходных данных по уязвимости СВКН. В работе совета принимали участие представители Министерства обороны и организаций оборонных отраслей промышленности. Целью данного органа было согласование исходных данных и оценка эффективности поражающего действия боеприпасов по воздушным целям на основе анализа результатов стрельб и летных испытаний.

В связи с отсутствием теоретических методов и моделей для описания процессов высокоскоростного взаимодействия поражающих факторов осколочно-фугасных боевых частей с воздушной целью в качестве главного метода исследования был принят метод физического моделирования на стрельбовом комплексе (первый начальник лаборатории – Евгений Дмитриевич Козлов). В основу метода и обоснования возможностей и ограничений таких исследований Золотовым были положены теоретические разработки академика Л.И. Седова по теории подобия и размерности в механике [2].

Новизна и сложность решаемых задач потребовали дальнейшего повышения уровня квалификации сотрудников, подготовки и защиты ряда кандидатских диссертаций, которые впоследствии легли в основу формирования научной школы по обоснованию специализированной системы исходных данных для проектирования и оценки эффективности вооружения ПВО.

Благодаря активной деятельности Золотова уже к апрелю 1958 года на окраине города Калинина был развернут наземный стрельбовый испытательный моделирующий комплекс полигонного типа и проведены первые эксперименты по исследованию уязвимости воздушной цели.

В этих уникальных экспериментах на базе НИИ-2 приняли участие ученые и специалисты всех заинтересованных советских организаций, таких как Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского, Центральный институт Министерства авиационной промышленности, Центральный институт химии и механики и др.

Основными подсистемами комплекса стали средства высокоскоростного метания осколочных поражающих элементов, мишенный комплекс и средства имитации реальных условий полета воздушной цели, средства измерения и регистрации быстропротекающих процессов поражения.

Впоследствии стрельбовый моделирующий комплекс был оснащен (с учетом требований теории подобия и физического моделирования) всем необходимым оборудованием и приборами для проведения экспериментальных исследований, включая пороховые и легкогазовые баллистические установки, барокамеры, «добытые» Золотовым, макеты и модели жизненно важных агрегатов летательных аппаратов, стенды нагружения, температурный стенд и другие устройства, рентгеноимпульсные средства измерения и регистрации быстропротекающих процессов.

Под руководством Евгения Васильевича в 1962 году в стране впервые был разработан межведомственный нормативно-технический документ, утвержденный Правительством СССР, позволяющий теоретически оценивать эффективность огневых средств ПВО на различных этапах их проектирования.

Проведенная апробация межведомственного нормативно-технического документа «Система исходных данных по поражающему действию осколков и осколочных потоков по воздушным целям, выполненным в аэродинамической схеме» (СИД-62) показала исключительно важную роль системы исходных данных в развитии методологии оценки эффективности стрельбы средствами ПВО по воздушным целям, определила круг соисполнителей и узаконила обязательное периодическое обновление СИД.

После увольнения из Вооруженных сил СССР Е.В. Золотов продолжил активную научную и организаторскую деятельность в Калининском политехническом институте. Ученым была создана кафедра автоматики, телемеханики и электроники, развернуты принципиально новые научные направления по созданию медицинских приборов и оборудования.

В 1970 году Евгений Васильевич был приглашен на работу в Дальневосточный научный центр Академии наук СССР для создания и развития в регионе научных институтов физико-математического и технического профиля. Он создал Вычислительный центр Дальневосточного научного центра и стал его первым директором. Кроме того, Золотов был избран членом Президиума Дальневосточного научного центра Академии наук СССР, председателем его Совета по физико-математическим и техническим наукам.

За заслуги перед отечественной наукой Е.В. Золотов в 1970 году был избран членом-корреспондентом, а в 1987-м – действительным членом Академии наук СССР. Вплоть до кончины в 1990 году Евгений Васильевич вел активную научную и педагогическую деятельность.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Евгений Васильевич Золотов оставил не только неизгладимый след в отечественной науке, но и добрую память о себе как надежном друге и верном товарище. Воспоминаниям о нем, развитию его творческого наследия посвящаются периодически проводимые «Золотовские чтения», в организации которых участвуют представители научных школ, созданных Евгением Васильевичем в НИИ-2 (ныне ЦНИИ ВКС Минобороны России) и в Тверском политехническом институте (ныне Тверской государственный технический университет).

В настоящее время разработка аналогичного нормативно-технического документа и исследования, основателем которых был Евгений Васильевич Золотов, продолжается в ЦНИИ ВКС Минобороны России. Институт является головным

исполнителем работ в кооперации с организациями Министерства обороны и оборонных отраслей промышленности России.

В основе современной методологии исследования в значительной степени использованы принципы организации военно-научных исследований, предложенные Золотовым. Он считал, что в военной организации в ходе научного исследования необходимо до принятия решения обеспечить равенство прав исследователей и командиров. Это позволяло значительно повысить эффективность работы и выявить наилучшие варианты решений.

Другие принципы, как показало дальнейшее развитие военной науки, потребовали существенного расширения в новых нормативно-технических документах описательных характеристик летательных аппаратов как объектов поражения.

Из-за усложнения средств воздушного нападения и оружия ПВО в 70–80-е годы XX века возникла необходимость не только в изучении характеристик уязвимости целей, но и в подробном прогнозировании комплекса характеристик летательных аппаратов, включая их отражательные характеристики в радиолокационном и лазерном диапазонах длин волн, излучательные характеристики в оптическом диапазоне длин волн. Состав характеристик летательных аппаратов и направления исследований непрерывно развивались по мере создания новых информационных и огневых систем, совершенствования самих летательных аппаратов.

Современная математическая формулировка показывает методический подход к разработке специализированных характеристик летательных аппаратов иностранных государств не только по характеристикам уязвимости, но и по другим характеристикам, востребованным при обосновании построения вооружения ПВО и в дальнейшем ВКО. Она представлена как математическая задача условной оптимизации с ограничениями на ресурсы и требуемый период прогнозирования и демонстрирует конфликтную постановку противоборства ВКО с СВКН [3]:

$$\Omega_{СВКН}^* = \arg \max_{\Omega_{ВКО}} \min_{\Omega_{СВКН}} U_{ОБ}(\Omega_{СВКН}, \Omega_{ВКО}),$$

где $\Omega_{СВКН}^*$ – множество искомых характеристик СВКН, включающих формы и способы их применения, количественный состав, варианты действий и технические характеристики; $U_{ОБ}$ – максимально возможный предотвращенный ущерб при максимально эффективных формах и способах боевого применения, количественном составе, вариантах действий и технических характеристиках СВКН; $\Omega_{ВКО}$ – множество возможных вариантов характеристик ВКО (ПВО); $\Omega_{СВКН}$ – множество возможных вариантов характеристик СВКН.

Расширение перечня исследуемых характеристик летательных аппаратов потребовало и значительных изменений в составе экспериментальной лабораторной базы. Современный экспериментальный комплекс ЦНИИ ВКС (преемника НИИ-2) включает четыре основные измерительные системы: эталонный радиолокационный измерительный комплекс «ЭРИК-1» (рис. 3а); стрельбовый моделирующий комплекс «СМК» (рис. 3б); оптический измерительно-испытательный комплекс «Фотон» (рис. 3в); специальный стенд для исследования воздействия ионизирующих излучений «У-23» (рис. 3г) [4].

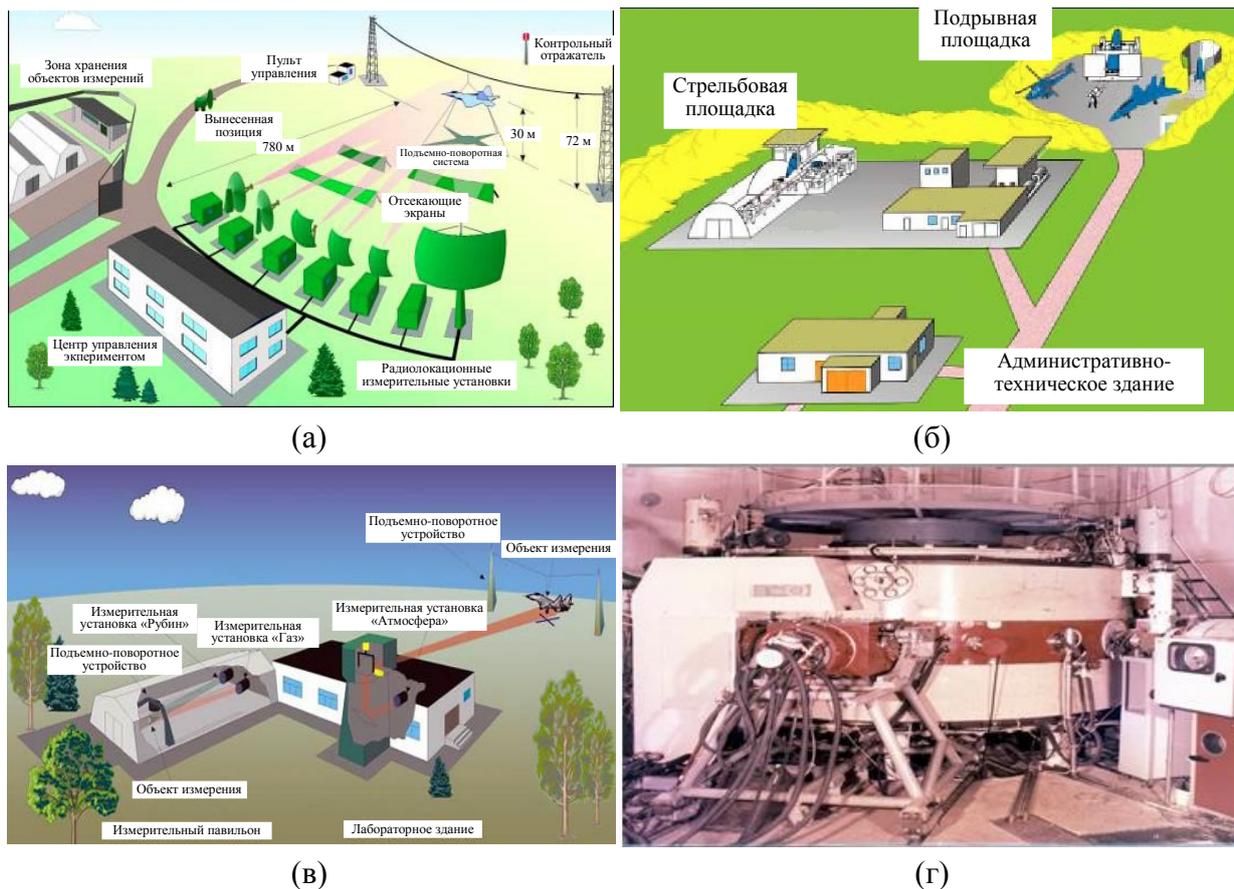


Рис. 3. Экспериментальная лабораторная база Тверского научно-исследовательского центра ЦНИИ ВКС Минобороны России (2022 год):
 эталонный радиолокационный измерительный комплекс «ЭРИК-1» (а);
 стрельбовый моделирующий комплекс «СМК» (б);
 оптический измерительно-испытательный комплекс «Фотон» (в);
 стенд для исследования воздействия ионизирующих излучений «У-23» (г)

Большое значение в рассматриваемой научной школе придается метрологическим параметрам экспериментальных комплексов, непрерывному совершенствованию этих параметров, обеспечивающих достоверность получаемых характеристик и их высокую практическую ценность. Значительный вклад в ее развитие внесли начальники института С.Ф. Ниловский, Б.А. Королев, С.С. Сапегин, А.С. Сумин, А.Т. Силкин, С.В. Ягольников, заместители начальника института по научной работе Я.И. Трегуб и Ю.И. Любимов, профессор Е.С. Сиротинин и др. В настоящее время научной школой по разработке системы исходных данных руководят кандидат технических наук, доцент Михаил Леонидович Цурков и доктор технических наук, профессор Георгий Александрович Лопин – авторитетные ученые и организаторы современного коллектива исследователей.

В рамках научной школы, созданной Е.В. Золотовым, подготовлены двадцать пять докторов наук, сто двадцать кандидатов военных и технических наук. Опубликовано более двух тысяч научных трудов по материалам исследований, свыше четырехсот авторских свидетельств СССР и патентов Российской Федерации. В настоящее время в коллективе трудятся шесть докторов и более сорока кандидатов наук, включая четырех персональных стипендиатов Президента Российской Федерации, осуществляющих исследования по всему спектру научных направлений, связанных с получением

специальных характеристик летательных аппаратов. Непрерывно осуществляется подготовка научных кадров в рамках очной докторантуры и адъюнктуры. Обеспечивается преемственность поколений ученых.

Многие традиции научной школы стали продолжением традиций ведущих научных школ СССР и Российской Федерации. Среди ученых, определяющих в настоящее время высокий уровень и перспективы развития научной школы, активно трудятся выпускники Военно-воздушной инженерной академии имени Н.Е. Жуковского, Военной академии РВСН имени Петра Великого, Военной академии ВКО имени Маршала Советского Союза Г.К. Жукова, а также выпускники ведущих российских вузов, таких как МГТУ им. Н.Э. Баумана (ранее МВТУ им. Н.Э. Баумана), МГУ, МИФИ, МФТИ, РХТУ им. Д.И. Менделеева и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимо отметить, что отличительной особенностью работ в рамках данной научной школы, созданной академиком Золотовым, является проведение исследований в различных областях науки и техники, необходимых для определения характеристик летательных аппаратов. Диапазон исследований простирается от решения задач кинетики физико-химических процессов плазмообразования, сопутствующих реальному полету гиперзвуковых летательных аппаратов, свойств материалов и покрытий конструкций, траекторных характеристик целей до фундаментальных исследований высокоскоростной деформации материалов, распространения и рассеяния оптических и радиоволн трехмерными объектами сложной пространственной структуры [5].

Состав характеристик летательных аппаратов, а также направления их исследования постоянно развиваются по мере совершенствования СВКН и создания новых информационных и огневых систем. С самого начала развития и становления научной школы Золотова впервые в практике создания отечественных вооружений объекты поражения анализировались строго в комплексной взаимосвязи не только тактико-технических характеристик и уязвимости летательных аппаратов к поражающему действию боеприпасов, но и радиолокационной и оптической заметности.

ЛИТЕРАТУРА

1. 80 лет НИИ-2. От Артиллерийского стрелкового комитета РККА до 2-го Центрального научно-исследовательского института и НИЦ ЦНИИ ВВКО Министерства обороны Российской Федерации / под ред. А.А. Травкина. Тверь: Полипресс. 2015. 472 с.
2. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука. 1987. 432 с.
3. Характеристики уязвимости воздушных целей при действии осколочно-фугасных боеприпасов. Методы исследования: монография / под ред. Г.А. Лопина. Тверь: Полипресс. 2021. 499 с.
4. Оружие и технологии России. Энциклопедия. XXI век. *Противовоздушная и противоракетная оборона*. М.: Оружие и технологии. 2004. Т. 9. 752 с.
5. Лопин Г.А. Ведущая научная школа Российской Федерации по обоснованию специализированной системы характеристик средств воздушно-космического нападения // *Военная мысль*. 2015. № 9. С. 15–22.

Для цитирования: Цурков М.Л., Лопин Г.А. Научная школа академика Е.В. Золотова в ЦНИИ ВКС Минобороны России: этапы создания, достижения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 4 (16). С. 88–97.

**SCIENTIFIC SCHOOL OF ACADEMICIAN E.V. ZOLOTOV
AT THE CENTRAL RESEARCH INSTITUTE OF THE AEROSPACE FORCES
OF THE MINISTRY OF DEFENSE OF RUSSIA:
STAGES OF CREATION, ACHIEVEMENTS**

M.L. TSURKOV, Cand. Sc., G.A. LOPIN, Dr. Sc.

Central Research Institute of the Aerospace Forces
of the Ministry of Defense of Russia, 32, Af. Nikitina emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: MLTS69@yandex.ru

The article is devoted to the analysis of the main results of the scientific work of the full member of the Academy of Sciences of the USSR Evgeny Vasilyevich Zolotov. The period 1942–1967 is considered his formation and military service in the NII-2 MO, now the Central Research Institute of the Aerospace Forces of the Ministry of Defense of Russia. The work is dedicated to the 100th anniversary of the researcher's birth. His main theoretical developments as the first doctor of science at NII-2 MO, the features of the scientific school he created at the Institute are presented. An analysis is given of the proposed research methodology and the basics of building in Tver (Kalinin) a firing simulation complex for an experimental study of the vulnerability of air targets to the damaging effect of anti-aircraft guided air defense missiles with a proximity fuse. The research directions of Zolotov E.V., the main achievements and the level of their development at the present time.

Keywords: air targets, anti-aircraft guided missiles, scientific school, air defense, systems analysis, firing simulation system, vulnerability characteristics.

Поступила в редакцию/received: 21.07.2022; после рецензирования/revised: 05.09.2022;
принята/accepted: 15.09.2022

УДК 681.5

**ЭВОЛЮЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ МНОГОСТАДИЙНЫМИ
НЕПРЕРЫВНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

Б.В. ПАЛЮХ, д-р техн. наук, А.Н. ВЕТРОВ, канд. техн. наук

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

© Палюх Б.В., Ветров А.Н., 2022

Статья посвящена вопросам анализа основных научных направлений, связанных с деятельностью действительного члена АН СССР Е.В. Золотова в период его работы в Калининском политехническом институте. Рассмотрены вопросы гарантированного учета погрешностей и шумовых искажений, измеряемых и вычисляемых технологических переменных путем применения разработанного Е.В. Золотовым подхода, основанного на предложенном им понятии вариативных зон. Данный подход в настоящее время реализован в теории искусственного интеллекта на базе математического аппарата мягких измерений и вычислений. Обоснованы принципы эволюционного управления многостадийным непрерывным производством на основе теории свидетельств Демпстера – Шафера и методов интервального анализа. Сочетание

этих подходов позволяет создать более эффективную систему эволюционного управления многостадийным непрерывным производством по сравнению с традиционными методами и снизить чувствительность к шумовым помехам и задержкам в динамических каналах между входом и выходом непрерывного технологического процесса. Предлагаемые подходы проиллюстрированы постановкой конкретных задач с решениями контрольных примеров.

Ключевые слова: эволюционное управление, интервальный анализ, теория свидетельств Демпстера – Шафера.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-4-97-107

ВВЕДЕНИЕ

В 1970 году на факультете химического машиностроения Калининского политехнического института по инициативе доктора технических наук, профессора Евгения Васильевича Золотова была создана кафедра «Автоматизация процессов химической промышленности». В том же году Е.В. Золотов был избран членом-корреспондентом АН СССР по отделению математики (вычислительной техники), а в 1987 году – академиком АН СССР (отделение информатики, вычислительной техники и автоматизации). В дальнейшем он стал директором вычислительного центра Дальневосточного научного центра Академии наук СССР (ДВНЦ АН СССР), вице-президентом, членом Президиума, председателем Совета по физико-математическим и техническим наукам ДВНЦ АН СССР, но до 1990 года продолжал курировать созданную им кафедру. На рис. 1 академик Е.В. Золотов в составе государственной аттестационной комиссии вручает дипломы инженера первым выпускникам кафедры (1971 год). В своих дипломных проектах первые выпускники использовали идею вариативных зон, предложенную Евгением Васильевичем.



Рис. 1. Первый выпуск специальности
«Автоматизация и комплексная механизация химико-технологических процессов»

На рис. 2 представлены выпускники 1971 года, разработавшие комплексный дипломный проект по автоматизации ангарского нефтехимического комбината и использовавшие метод вариативных зон. В этом же году Золотов организовал межвузовскую научно-исследовательскую лабораторию кибернетики. Лаборатория в основном комплектовалась из выпускников кафедры.



Рис. 2. Выпускники, разработавшие комплексный дипломный проект для ангарского нефтехимического комбината

Большинство сотрудников лаборатории впоследствии защитили кандидатские и докторские диссертации, стали известными учеными. В результате развития научного наследия академика Е.В. Золотова в ТвГТУ в настоящее время работают такие кафедры, как «Информационные системы», «Электронно-вычислительные машины», «Автоматизация технологических процессов», «Программное обеспечение», «Информатика и прикладная математика», «Технология и автоматизация машиностроения», «Радиотехнические информационные системы».

ОТ ВАРИАТИВНЫХ ЗОН К МЯГКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ И ВЫЧИСЛЕНИЯМ

Применявшиеся ранее методы эволюционного управления многостадийным непрерывным производством в основном содержат математический аппарат, который малопригоден для обоснованной диагностики в условиях ненадежных измерений. Классические задачи параметрической диагностики решаются путем быстрого вычисления диагностических параметров на основе измеренных мгновенных значений измеряемых технологических переменных, таких как температура, давление, расход и т.п. Однако в данном случае вычисленные параметры могут иметь очень большую погрешность, поэтому система диагностики способна часто выдавать ложные сигналы тревоги или пропускать дефекты. Это связано со следующими факторами. Во-первых, мгновенные значения измеряемых переменных слишком чувствительны к шумовым помехам и могут случайным образом изменяться на значительную величину. Во-вторых, измеряемые переменные могут относиться как к входу, так и к выходу диагностического объекта, поэтому их значения будут отличаться на величину запаздывания динамического канала между входом и выходом. Снижение чувствительности к шумовым помехам достигается за счет использования вместо традиционной системы технической диагностики, основанной на анализе мгновенных значений диагностических параметров, такой диагностической системы, которая анализирует интервалы изменений диагностических параметров за заданный промежуток времени. При непрерывном производстве обычно области работоспособных состояний R и дефектных состояний D значительно перекрываются, поэтому принципиально невозможно избежать ошибочных решений. Вероятность ошибочных решений может быть снижена с помощью интервального анализа. Пусть существует интервал значений диагностического параметра

$$X = [\underline{x}; \bar{x}] = \{x \mid \underline{x} \leq x \leq \bar{x}; \underline{x}; \bar{x} \in R\},$$

где R – набор действительных чисел и, соответственно, верхнее и нижнее значения диагностического параметра.

Обозначим указанный интервал времени, в течение которого измеряется диагностическая переменная:

$$T = [\underline{t}; \bar{t}] = \{t \mid \underline{t} \leq t \leq \bar{t}; [\underline{t}; \bar{t}] \in R\}.$$

Здесь приведены нижняя и верхняя границы диапазона измерения временного интервала.

Покажем, что если анализировать не мгновенные значения диагностического параметра, а интервалы его изменения за заданный интервал времени, то вероятности ложной тревоги и пропуска дефекта уменьшаются. Рассмотрим график функций плотности вероятности распределения диагностических параметров (рис. 3).

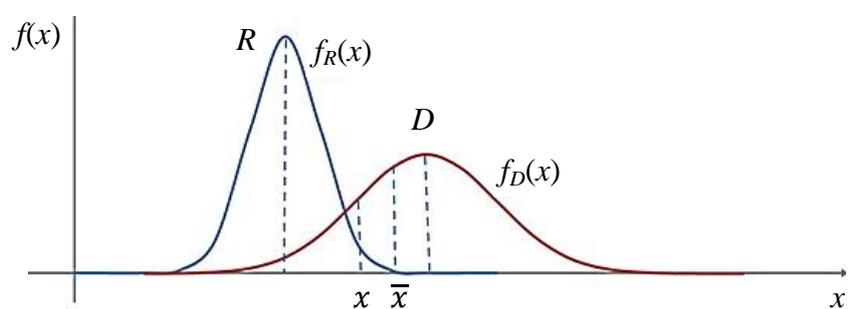


Рис. 3. Функции плотности вероятности распределения диагностических параметров: R – область функционального состояния; D – область дефектного состояния; $f_R(x)$ и $f_D(x)$ – функции плотности вероятности для областей R и D соответственно

Из рис. 3 следует, что вероятность ложной тревоги системы диагностики непрерывного производства, построенной на принципе анализа мгновенного значения диагностического параметра, больше, чем вероятность ложной тревоги системы диагностики, построенной на принципе анализа интервала значений диагностического параметра. Кроме того, вероятность пропуска дефекта в системе диагностики непрерывного производства, построенной на принципе анализа мгновенного значения диагностического параметра, больше, чем вероятность пропуска дефекта в системе диагностики, построенной на принципе анализа интервала значений диагностического параметра.

Таким образом, если анализировать не мгновенные значения диагностического параметра, а интервалы его изменения за заданный временной интервал, то вероятность ложной тревоги и пропуска дефекта снижается. Различия в значениях входных и выходных измеряемых переменных диагностического объекта, связанные с запаздыванием динамического канала между входом и выходом, могут быть преодолены путем выбора временного интервала T таким образом, чтобы $\bar{t} = t_0 + \tau$ (τ – время задержки динамического канала между входом и выходом объекта).

ИНТЕРВАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАСЧЕТНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Диагностические переменные делятся на наблюдаемые (z) и вычисляемые (x) переменные. В течение выбранного интервала времени измеряются интервалы наблюдаемых технологических переменных. Необходимо найти гарантированную

оценку рассчитанных диагностических показателей в виде интервалов. Математическая модель диагностического объекта обычно задается в виде системы алгебраических или дифференциальных уравнений. В нашем случае уравнения будут с интервальными переменными и коэффициентами. Рассмотрим решение этой задачи на примере производства слабой азотной кислоты.

В качестве примера построения параметрических моделей в виде интервальных обыкновенных дифференциальных уравнений возьмем модель превращения аммиака X_6 в слое катализатора:

$$\frac{dX_6}{dt} = 6750 \left(\frac{Z_4}{4}\right)^{0,56} \left(\frac{Z_5}{4,5}\right)^{0,59} e^{-793\left(\frac{1}{Z_3} - \frac{1}{1123}\right)} (1 - X_6), \quad X_6(0) = 0.$$

Представлены значения измеренных переменных:

$Z_3 = [1123; 1133]$ – температура закисных газов, К;

$Z_4 = [1,9; 2,1]$ – скорость газа в каталитическом реакторе, м/с;

$Z_5 = [898; 902]$ – температура закисного газа под решетками каталитического реактора, К.

Решая уравнение двусторонними численными методами [1], получим зависимость общей степени превращения аммиака X_6 в слое катализатора от времени t . Показанная на рис. 4 гарантированная оценка общей степени превращения аммиака представлена вариативной зоной. Она находится между линиями, определяющими верхнюю и нижнюю границы оценки общей степени превращения аммиака.

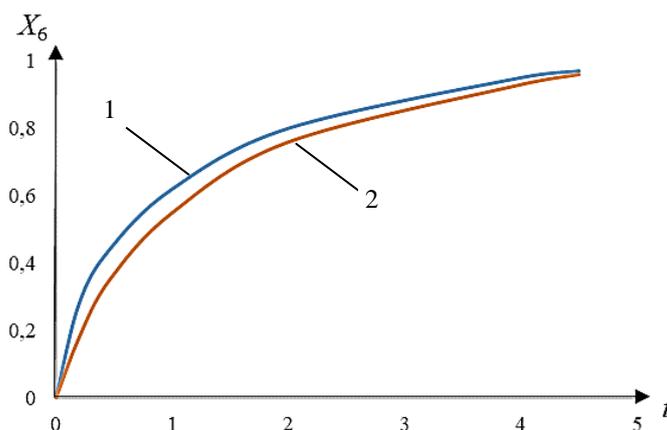


Рис. 4. Гарантированная оценка диагностического параметра:

1 – верхняя граница вариативной зоны; 2 – нижняя граница

Рассчитанные интервальные значения диагностических параметров позволяют эффективно решать задачу о состоянии отдельных узлов непрерывного производства. На базе проведенных исследований можно сделать вывод о необходимости построения диагностических систем для непрерывного производства не на основе традиционных принципов анализа мгновенных значений диагностических параметров, а на основе анализа интервалов изменения этих параметров за определенный временной интервал.

При использовании традиционных методов параметрической диагностики применяются специальные методики учета ошибок и сложные математические методы преобразования диагностических данных. Избавиться от этих недостатков можно, применив методы интервального анализа, позволяющие автоматически учитывать погрешность в измеренных исходных данных и облегчающие принятие решения о диагностике неисправности технологического оборудования.

ПРИНЦИПЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕРВАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Рассмотрим принципы использования интервального анализа для параметрической диагностики. Пусть x_i – значение i -го технологического изменения на исправном диагностическом объекте. За время эксплуатации рассматриваемого объекта переменная x_i будет отклоняться на некоторое небольшое значение δx_i . Чтобы диагностировать дефект на ранней стадии, необходимо измерить и проанализировать весь набор небольших отклонений переменных объекта. Значения x_i регистрируются измерительными приборами. Пусть погрешность измерения будет включена в значение δx_i . Для поиска дефекта анализируются соотношения между отклонениями этих переменных с использованием математических моделей объектов, в соответствии с которыми составляются линейные диагностические матрицы. Однако эту проблему можно решить и без использования диагностических матриц, если применить интервальный анализ непосредственно к математическим моделям объектов. Решение такой задачи возможно, если мы представим небольшие отклонения каждого i -го диагностического показателя в виде интервала $X = [\underline{x}; \bar{x}]$. Если значение i -й технологической переменной x_i увеличивается на величину δx_i во время работы оборудования, то границы интервала определяются как

$$\underline{x} = x_i; \quad \bar{x}_i = x_i + \delta x_i.$$

Если x_i уменьшается на δx_i , то

$$\underline{x} = x_i - \delta x_i; \quad \bar{x}_i = x_i.$$

Аналогичным образом можно учитывать временные интервалы (частоту) мониторинга. Если измерения технологической переменной выполняются периодически с периодом времени τ , то любое измерение переменной характеризует диагностический объект на протяжении всего j -го временного интервала $T_j = [\underline{t}_j; \bar{t}_j]$.

Здесь указаны $\underline{t}_j, \bar{t}_j$ – начало и конец временного интервала, в течение которого было выполнено j -е измерение:

$$\bar{t}_j = \underline{t}_j + \tau; \quad j = 1, 2, \dots$$

Наиболее важным при построении интервальных параметрических моделей является вопрос о методе нахождения минимальных интервальных расстояний. Он основан на определенных принципах:

1. Для ранней диагностики производства следует измерять и анализировать небольшие отклонения технологических переменных, присущие формам зарождающихся дефектов.

2. Использование метода малых отклонений предполагает анализ производственной операции в установившемся режиме.

3. В качестве параметрической диагностической модели рекомендуется использовать уравнения материального и теплового балансов технологического процесса, представленные в виде замкнутой системы нелинейных алгебраических уравнений с интервальными переменными и коэффициентами; эта система может быть дополнена уравнениями кинетики, гидро- и газодинамики.

4. Аналитическая форма каждого уравнения системы должна быть преобразована, чтобы уменьшить ширину естественного расширения интервала.

5. Чтобы строго гарантировать, что решение принадлежит полученным интервалам, необходимо учитывать ошибки компьютерного округления, но в практических расчетах эти ошибки невелики, поэтому ими можно пренебречь.

6. При использовании моделей на практике необходимо использовать одни и те же измерительные схемы для измерения наблюдаемых технологических переменных через разные промежутки времени, чтобы исключить систематические ошибки измерений.

7. Из-за задержки динамического канала между входом и выходом диагностического объекта временной интервал $T_j = [t_j; \bar{t}_j]$ измерения технологических переменных должен быть установлен таким образом, чтобы $t_j = t_0$ и $\bar{t}_j = t_0 + \tau$, где t_0 – начало измерения интервала изменения технологической переменной; τ – время задержки динамического канала между входом и выходом объекта.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ СВИДЕТЕЛЬСТВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОМЫШЛЕННОЙ ДИАГНОСТИКИ

Для принятия решений по управлению эксплуатационной надежностью в рамках поставленной задачи необходимо использовать методы искусственного интеллекта, позволяющие оценивать вероятность и учитывать неопределенности в исходной информации. Пусть существует набор объектов C и набор всех возможных свойств S , которыми они могут обладать. Необходимо определить объекты с заданными свойствами по известному набору признаков P . Затем (в соответствии с источником [2]) каждому k -му признаку P_k присваивается нечеткий набор объектов C_k :

$$C_k = \{c_i; \mu_k(c_i)\}; C_k \in C,$$

где c_i – объекты, которые могли бы обладать указанными свойствами в соответствии со значением k -го атрибута; $\mu_k(c_i)$ – функция принадлежности элемента c_i множеству C_k (равна степени достоверности, уменьшенной до диапазона $[0; 1]$, при наличии указанного свойства по k -му атрибуту объекта c_i); C – полный набор объектов.

Пусть текущая ситуация соответствует набору зарегистрированных объектов: $P^* = \{P_k | P_k = 1\}$. Обозначим набор объектов, которые фактически содержат указанные свойства, как C^* . Процедура определения объектов с заданными свойствами сводится к решению логического уравнения

$$F: P^* \rightarrow C^*, \tag{1}$$

где F – функция-предикат вида

$$F = \bigwedge_{P_k=1} (\bigvee_{c_i \in C_k} c_i); C_k \in C. \tag{2}$$

Решение уравнения (2) можно найти в виде

$$C^* = \bigcap_{P_k \in P^*} c_i | c_i \in C_k.$$

Если наличие свойства у объекта c_i является необходимым и достаточным условием для появления всех признаков P_k , то решение формулы (2) может быть найдено с использованием булевых или байесовских подходов. На практике это предполагает требования взаимной независимости и однозначности отношений между свойствами и объектами. В настоящее время существуют методы, позволяющие смягчить данные требования. При использовании метода нечетких множеств это достигается за счет расширения набора C_k путем включения в него маловероятных

гипотез на этапе экспертной классификации. Таким способом создается определенная информационная избыточность при решении задачи.

При нахождении решения уравнения (1) в виде (2) методом нечетких множеств степень принадлежности объекта c_N к набору заданных свойств определяется как

$$\mu^*(c_N) = \max\{\mu_i(c_N), \mu_j(c_N)\}, \quad i \neq j,$$

где $\mu_i(c_N)$ – степень принадлежности объекта c_N к множеству C_i , активируемому появлением знака $P_i = 1$.

Однако ни булев, ни байесовский подходы, ни даже метод нечетких множеств не позволяют использовать процедуру (1) без учета требований взаимной независимости и однозначности отношений между свойствами и объектами для получения надежного и полного решения, поскольку неопределенность, связанная с принятием решения, не исчерпывается нечеткостью экспертных оценок. Это может быть вызвано стохастическим характером процессов, нестабильностью параметров, шумом измерений и т.д. Для решения таких задач наиболее перспективным является подход, основанный на использовании мер неопределенности, который включает интуитивно обоснованные минимальные свойства. Основная идея данного подхода заключается в том, что определенная мера вероятности может быть отнесена не только к отдельным элементам набора событий в предметной области, но и к подмножеству данного набора в целом. Таким образом, наиболее целесообразно принимать решения для этой задачи на основе теории свидетельств Демпстера – Шафера [3].

Рассмотрим применение теории Демпстера – Шафера на конкретном примере. Степень влияния k -й диагностической переменной на кризисное состояние i -й стадии процесса оценивается экспертами в диапазоне от 0 до 100. Например, если интервальное значение диагностической переменной X_1 превысило диапазон нормативных значений, то в технологической цепи C_1 имеются нарушения с вероятностной мерой, равной 20, в цепи C_2 – с вероятностной мерой, равной 40, в цепи C_5 – с вероятностной мерой, равной 60. Исходные экспертные данные для многостадийного непрерывного производства представлены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные экспертные данные

Диагностические переменные	Технологические цепи (стадии)				
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
X_1	20	40			60
X_2	15		40		
X_3	90	30	30	20	

Предположим, что интервальные значения диагностических показателей X_1 и X_3 были получены на заданном интервале времени наблюдения и превысили допустимый диапазон изменений диагностических показателей. Исходные данные: $X_1 = [42,8\%; 52,4\%]$; $X_2 = [53,0\%; 58,0\%]$. При допустимом диапазоне измерений 50–55 % мы рассчитываем вероятность нарушения технологического режима:

$$P_{x_1} = \frac{(50,0 - 42,8)}{(52,4 - 42,8)} = 0,75; \quad P_{x_2} = \frac{(58,0 - 55,0)}{(58,0 - 53,0)} = 0,6.$$

Выход диагностических показателей X_1 и X_2 за пределы нормативных значений указывает на вероятные нарушения технологического процесса. После нормализации и перераспределения вероятности в соответствии с процедурой, описанной в источнике [4], получаем два свидетельства:

$$m_1 = \langle C_1, C_2, C_5, A \rangle = \langle 0,13; 0,25; 0,48; 0,25 \rangle;$$

$$m_2 = \langle C_1, C_2, (C_3, C_4), A \rangle = \langle 0,32; 0,18; 0,10; 0,40 \rangle.$$

Согласно правилу Демпстера, комбинация различных свидетельств с распределениями вероятностей m_1 и m_2 выполняется следующим образом:

$$m(A_N) = \frac{1}{1 - m(\emptyset)} \sum_{C_i \cap C_j} m_1(C_i) * m_2(C_j),$$

где $m(A_N)$ – функция объединения свидетельств $m_1(C_i)$ и $m_2(C_j)$, соответствующих наличию свойства объекта A_N ; \emptyset – пустое множество.

Степень вероятности, которая выпадает на пустое множество:

$$m(\emptyset) = \sum_{C_i \cap C_j} m_1(C_i) * m_2(C_j).$$

Результаты расчетов с использованием традиционных методов и предложенной методологии представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчетов

Метод нечетких множеств	Метод Демпстера – Шафера
Результат: $A^* = \{(C_1; 0,2) (C_2; 0,4)\}$	Результат: $C_1[0,26; 0,41], C_2[0,28; 0,43], C_3[0,03; 0,18],$ $C_4[0,03; 0,18], C_5[0,29; 0,44], A[1,0; 1,0]$
Отказ от гипотезы о нарушении в цепи C_5 приводит к ошибке типа 2	Гипотезы о критическом состоянии цепи C_5 оставлены. Его причина установлена

Метод нечетких множеств, ввиду невыполнения условия необходимости, отвергает гипотезу о нарушении в цепочке C_5 , что приводит к ошибке 2-го типа.

Подход к учету неопределенности при диагностике состояния сложных технических систем обеспечивает ряд преимуществ по сравнению с байесовским подходом или подходом, основанным на использовании нечетких множеств. В частности, применение правила Демпстера позволяет преобразовать результаты многих оценок таким образом, чтобы сделать их непротиворечивыми и использовать для объединения с результатами математического моделирования. Кроме того, использование теории доказательств позволяет сократить условия необходимости и достаточности за счет перераспределения части уверенности по всему набору возможных гипотез.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании вышеизложенного можно сделать выводы:

1. Идеи академика Е.В. Золотова в области моделирования систем управления большими оборонными и производственными объектами значительно опережали свое время и впоследствии легли в основу конкретных разделов теории искусственного интеллекта. В частности, идеи ученого были реализованы в виде методов интервального анализа и мягких измерений и вычислений.

2. В настоящей статье рассмотрены теоретические и прикладные основы построения системы эволюционного управления многостадийным непрерывным производственным процессом.

3. Для снижения чувствительности системы к шумовым помехам и запаздываниям по динамическим каналам между входом и выходом каждой стадии непрерывного технологического процесса вместо традиционной диагностической системы, основанной на анализе мгновенных значений потоковых данных технологических переменных, поступающих от сенсоров работающего оборудования, предлагается система, которая обрабатывает интервалы изменения диагностических переменных на заданных интервалах времени.

4. В настоящей статье изучена процедура формирования гипотез для принятия решений с использованием функций доверия – основы теории свидетельств. Эти гипотезы характеризуются интервалом вероятности дефекта на анализируемой стадии производства.

5. Дальнейшие исследования предполагают разработку процедуры автоматического преобразования гипотез в нечеткие продукционные правила, что является предпосылкой к применению нечетких нейронных сетей для получения достоверной оценки степени уверенности в причине дефекта.

Данный проект выполнен при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-07-00199).

ЛИТЕРАТУРА

1. Шарий Д.С. Конечномерный интервальный анализ. Новосибирск: XYZ. 2019. 629 с.

2. Кафаров В.В., Палюх Б.В., Перов В.Л. Решение задачи технической диагностики непрерывного производства с помощью интервального анализа // *Доклад АН СССР*. 1990. Т. 311. № 3. С. 677–680.

3. Yager R.R., Liu L. Classic works of the Dempster – Shafer theory of belief functions. *Studies in fuzziness and soft computing*. 2008. V. 219. Berlin: Springer.

4. Палюх Б.В., Ветров А.Н., Александрова Д.С. Идентификация критических состояний при управлении эволюцией многостадийного производства в условиях неопределенности // *Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте*. Переславль-Залесский: РАИИ, 2019. С. 231–241.

Для цитирования: Палюх Б.В., Ветров А.Н. Эволюционное управление многостадийными непрерывными технологическими процессами // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 4 (16). С. 97–107.

MANAGEMENT OF MULTISTAGE MANUFACTURING BASED ON EVIDENCE THEORY AND METHODS OF INTERVAL ANALYSIS

B.V. PALYUKH, Dr. Sc., A.N. VETROV, Cand. Sc.

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

The article is devoted to the analysis of the main scientific directions related to the activities of the full member of the USSR Academy of Sciences E.V. Zolotov during his work at the Kalinin Polytechnic Institute. The issues of guaranteed accounting of errors and noise distortions, measured and calculated technological variables are considered by applying the approach developed by E.V. Zolotov, based on the concept of variable zones proposed by him. This approach is currently implemented in the theory of artificial intelligence based on the mathematical apparatus of soft measurements and calculations. The principles of evolutionary management of multistage continuous production are substantiated on the basis of the Dempster – Schafer evidence theory and interval analysis methods. The combination of these approaches makes it possible to create a more efficient system of evolutionary control of multistage continuous production compared to traditional methods and reduce sensitivity to noise interference and delays in dynamic channels between the input and output of a continuous technological process. The proposed approaches are illustrated by setting specific tasks with solutions of control examples.

Keywords: evolution management, interval analysis, Dempster – Schaefer evidence theory.

Поступила в редакцию/received: 07.07.2022; после рецензирования/revised: 30.08.2022;
принята/accepted: 12.09.2022

УДК 004.942

ОЦЕНКА ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНЫХ ДАЛЬНОМЕРОВ В СОСТАВЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ЛОКАЦИИ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ

Р.А. ЕГУЖОКОВ¹, И.М. ХМАРОВ¹, канд. техн. наук,
Л.Ф. ШЕВЧЕНКО¹, канд. техн. наук, В.В. МЕШКОВ², д-р техн. наук,
Г.Н. МАРКУШИН³

¹ЦНИИ ВКС Минобороны России,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 32, e-mail: vse_ki@mail.ru

²Тверской государственной технической университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: common@tstu.tver.ru

³АО «Производственное объединение “Уральский оптико-механический завод”
им. Э.С. Яламова», 620100, Екатеринбург, ул. Восточная, 33Б, e-mail: geo@uomz.com

© Егужоков Р.А., Хмаров И.М., Шевченко Л.Ф.,
Мешков В.В., Маркушин Г.Н., 2022

Рассмотрены вопросы проведения испытаний лазерных дальномеров на открытых трассах при локации воздушных объектов в ближнем и коротковолновом инфракрасных диапазонах длин волн. Разработан и апробирован метод, при помощи

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 4 (16), 2022*

которого реализуются процессы измерений и калибровки сигналов с использованием аэроэталонов. Данный метод базируется на определении эффективной площади рассеяния воздушных объектов, расчете коэффициентов пропускания локационных оптических трасс, экспериментальных измерениях максимальных дальностей сопровождения аэроэталонов лазерными дальномерами, установлении ракурсов объектов по их двумерным изображениям, расчете дальностей действия дальномеров при локации типовых воздушных объектов. Представлены результаты испытаний двух оптико-электронных систем с лазерными дальномерами. Проведена оценка дальностей действия лазерных дальномеров в соответствии с заданными требованиями.

Ключевые слова: лазерный дальномер, эффективная площадь рассеяния, воздушный объект, натурные измерения, испытания, дальность действия, аэроэталон, многоканальная оптико-электронная система.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-4-107-117

ВВЕДЕНИЕ

Оценка дальности действия (ДД) лазерных дальномеров (ЛД) (при их испытаниях на открытых трассах) до эталонных, типовых и зачетных воздушных объектов имеет большое значение для расчета показателей качества и эффективности как ЛД, так и оптико-электронных систем (ОЭС) в целом [1–5]. При этом подобные испытания являются основой для верификации имитационных математических моделей (ИММ), функционирования многоканальных ОЭС [3, 4, 6–8]. Однако при проведении натурных исследований на открытых трассах всегда существуют сложности, связанные с калибровкой (эталонированием) отраженных сигналов, а также снижением систематических и случайных погрешностей оценки характеристик прозрачности атмосферы [3, 6, 9, 10]. Таким образом, задачи, связанные с повышением достоверности получаемых показателей качества ЛД, являются актуальными [1–3, 6].

Цели данной статьи: разработка методического обеспечения и проведение испытаний двух типов ЛД в составе двух вариантов ОЭС.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются ЛД в составе наземных ОЭС, предназначенных для локации воздушных объектов (ВО) [1, 3, 6, 11].

Оценка ДД (дальности обнаружения, захвата на сопровождение) ВО с помощью ЛД базируется на методе проведения натурных экспериментов по полученной информации от эталонов.

Данный метод включает этапы:

1. Определение эффективной площади рассеяния (ЭПР) аэроэталонов (АЭ) и типовых ВО.
2. Проведение натурных измерений (с заданными параметрами обнаружения) максимальных ДД ЛД до АЭ.
3. Определение (коррекция, если возникает необходимость) высотной зависимости коэффициента ослабления лазерного излучения α (Z) при существующих во время испытаний ЛД фоновых и метеоусловиях (ФМУ).
4. Оценка ДД (максимальных ДД) ЛД до типовых ВО при существующих и заданных ФМУ.

Перейдем к описанию этапов метода.

Определение ЭПР АЭ и типовых ВО

При определении ЭПР ВО могут использоваться:

экспериментально-теоретический метод определения (синтеза) лазерно-локационных характеристик летательных аппаратов (ЛА) в реальных условиях их применения [6, 7, 12, 13];

полунатурные измерения лазерно-локационных характеристик объектов (их физических моделей) в безэховом павильоне [6, 10, 12];

полунатурные и натурные измерения лазерно-локационных характеристик ЛА (их мишеней-аналогов) на открытых трассах [6, 10, 12, 14].

Измерение максимальных ДД ЛД до АЭ

Одной из важнейших задач организации тестирования и натурных испытаний ЛД на открытой приземной трассе является устранение систематических погрешностей, связанных с затуханием лазерного излучения вдоль наклонных атмосферных локационных трасс.

Принципиальная возможность существенной компенсации таких погрешностей и получения требуемой точности измерения характеристик отражения объектов в натуральных условиях достигается при дополнительной калибровке по аэроэталонным отражателям [3, 7, 8].

В данном случае АЭ – это сфера с монотонным диффузным покрытием, ЭПР которой с любого ракурса можно выразить формулой

$$\sigma_A = \rho_{\text{э}} \cdot \frac{8}{3} \cdot \pi R^2, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{э}}$ – коэффициент отражения покрытия; R – радиус сферы (шара).

Сам АЭ может быть выполнен в двух вариантах:

- 1) в виде объекта, способного подниматься вверх в воздушной среде под действием силы Архимеда;
- 2) в виде объекта, доставляемого на заданную высоту (миниэропланом, авиационным средством, выстрелом и т.д.), после чего совершающего свободное падение.

Ключевыми действиями разработанного метода являются (рис. 1) запуск АЭ с известными значениями ЭПР; сопровождение АЭ пассивными каналами ОЭС (в автоматическом или ручном режимах); измерение максимальной дальности обнаружения L_A^{\max} АЭ ЛД при реализации заданных вероятностей правильного обнаружения P_D и ложной тревоги P_F [3, 8].

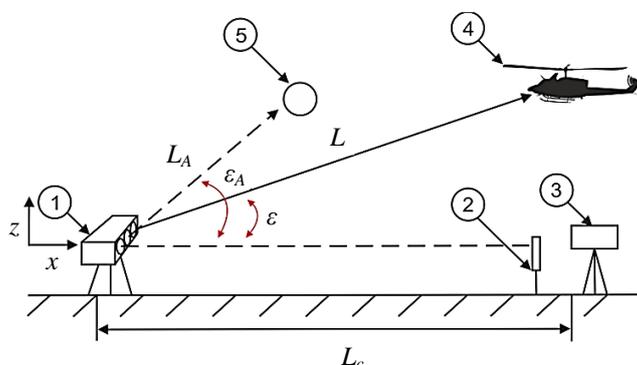


Рис. 1. Схема измерения: 1 – ОЭС; 2 – эталонный отражатель; 3 – эталонный излучатель; 4 – ВО; 5 – АЭ (сфера)

Для фиксации вероятности ложной тревоги P_F необходимо выставить в приемном канале ЛД пороговый уровень, соответствующий одному ложному срабатыванию (при открытой апертуре ЛД) на каждые $1/P_F$ импульсов лазерного передатчика [7].

На практике уровень вероятности правильного обнаружения P_D реализуется, когда цель обнаруживается $(N - 1)$ импульсами и не обнаруживается одним из каждых N импульсов ЛД, где $N = 1/1 - P_D$ (так, например, уровень $P_D = 0,95$ реализуется, когда цель обнаруживается девятнадцатью и не обнаруживается одним из каждых двадцати импульсов ЛД, и т.д.).

Одновременно на приземной трассе с помощью эталонных излучателей и отражателей могут калиброваться пассивные каналы ОЭС (см. рис. 1). Таким образом, при работе, например, с двумя АЭ (но с разными ЭПР) определяются значения их максимальных дальностей обнаружения L_{A1}^{\max} и L_{A2}^{\max} . При этом вычисляются соответствующие координаты АЭ: высоты Z_{A1}^{\max} , Z_{A2}^{\max} и углы места ε_{A1} , ε_{A2} .

Определение высотной зависимости коэффициента ослабления лазерного излучения

Коэффициент пропускания узкополосного лазерного излучения атмосферой вдоль наклонной трассы можно рассчитать по формуле [3]

$$T = \exp \left[- \int_0^H \frac{\alpha_\lambda(z) dz}{\cos(\frac{\pi}{2} - \varepsilon)} \right], \quad (2)$$

где $\alpha_\lambda(Z)$ – высотный ход коэффициента ослабления атмосферой лазерного излучения с длиной волны λ ; d – диаметр приемной апертуры; ε – угол места летящего на высоте Z лоцируемого объекта в системе координат, связанной с наземным ЛД (в сумме с зенитным углом он составляет $\pi/2$). Здесь используется базисная прямоугольная пространственная система координат.

Одним из ключевых параметров, определяющих пропускание приземного атмосферного слоя, является метеорологическая дальность видимости (МДВ) [3, 4, 6]. Она измеряется аппаратурой, которой снабжается ОЭС при испытаниях и калибровке.

Еще одним существенным фактором, влияющим на работу ЛД (особенно в дневных условиях), выступают фоновые помехи. Уровень фоновой помехи от небосвода (или подстилающей поверхности) рассчитывается из соотношения

$$P_B = \frac{B \cdot \Delta\lambda \cdot \tau_F \cdot \pi^2 \cdot \theta_r^2 \cdot d^2}{16}, \quad (3)$$

где B – спектральная яркость фона [3, 4]; $\Delta\lambda$ – ширина полосы пропускания узкополосного фильтра в районе λ_1 ; τ_F – коэффициент пропускания узкополосного фильтра на входе ФПУ; θ_r – поле зрения приемного канала; d – диаметр приемной апертуры.

Высотный ход коэффициента ослабления атмосферой лазерного излучения $\alpha_\lambda(Z)$ с длиной волны λ во время испытаний ЛД на открытой трассе может быть рассчитан с помощью известных моделей атмосферы MODTRAN, HITRAN и др. [3, 4, 6, 7]. При этом используются текущие данные от аппаратуры метеопоста: температура окружающего воздуха, давление, относительная влажность воздуха и МДВ.

Используем для дальнейшего анализа понятие потенциала ЛД, который определяется по соотношению

$$\Pi = \frac{P_t \cdot T_{opt} \cdot d^2}{4\pi\theta_t^2}, \quad (4)$$

где P_t – выходная мощность излучения ЛД; T_{opt} – коэффициент пропускания приемно-перетекающего тракта; d – диаметр приемной апертуры; θ_t – расходимость лазерного излучения.

Тогда мощность принимаемого полезного сигнала, отраженного от объекта, летящего на высоте Z , можно вычислить по формуле [3, 11]

$$P = \frac{\sigma \cdot T^2 \cdot \sin^4(\varepsilon)}{Z^4} \Pi. \quad (5)$$

Если P_B – фоновая помеха, то можно записать

$$P = P_r - P_B,$$

где P_r – суммарная принимаемая мощность оптического излучения.

Далее заметим, что если для двух АЭ отношения сигнал/шум равны и уровни ложных тревог P_F при их локации идентичны, то, опираясь на инвариантность ЭПР АЭ относительно их ракурса, а также на формулы (4) и (5), можно записать

$$\frac{T_{A1}}{T_{A2}} = \sqrt{\frac{\sigma_{A2}}{\sigma_{A1}}} \cdot \left[\frac{Z_{A1}^{\max} \cdot \sin(\varepsilon_{A2})}{Z_{A2}^{\max} \cdot \sin(\varepsilon_{A1})} \right]^2, \quad (6)$$

где T_{A1} , T_{A2} – коэффициенты пропускания локационных трасс при обнаружении АЭ; σ_{A1} , σ_{A2} – ЭПР АЭ (индексы 1 и 2 относятся к первому и второму АЭ соответственно); Z_{A1}^{\max} , Z_{A2}^{\max} – высоты лоцируемых объектов; ε_{A1} , ε_{A2} – углы места лоцируемых объектов.

Таким образом, применение группы АЭ дает возможность оперативной (в случае необходимости) *коррекции* расчетных значений высотного хода коэффициента ослабления атмосферой лазерного излучения $\alpha_\lambda(Z)$ на трассе, где проводятся испытания ЛД.

Оценка ДД ЛД до типовых ВО при существующих и заданных ФМУ

При априорном знании характеристик ЭПР типовых ВО в полете необходимо вычислить текущую угловую ориентацию ЛА. В статье [15] представлены численные методы определения пространственного положения ЛА по его плоскому оптическому изображению (метод опорных точек и метод внешних контуров). В задачу определения пространственного положения ЛА по его 2D-изображению входит получение трех линейных (X , Y , Z) координат геометрического центра и трех угловых (ψ , ϑ , γ) координат ориентации в заданной системе отсчета. При этом сравниваются реальное и моделируемое оптические изображения ЛА [15]. На рис. 2 и 3 с помощью специального программного обеспечения для обработки файла с измерительной информацией из каналов сопровождения ЛА показано определение угловой ориентации самолета и вертолета.

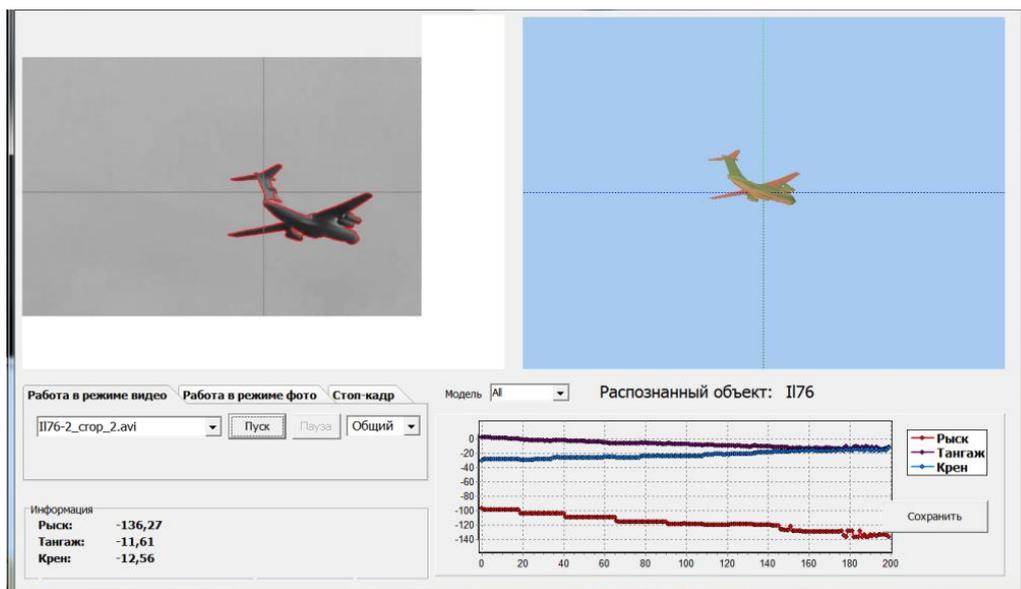


Рис. 2. Самолет (мгновенные значения углов ориентации: курс (рыскание) $-136,27^\circ$; тангаж $-11,61^\circ$; крен $-12,56^\circ$)

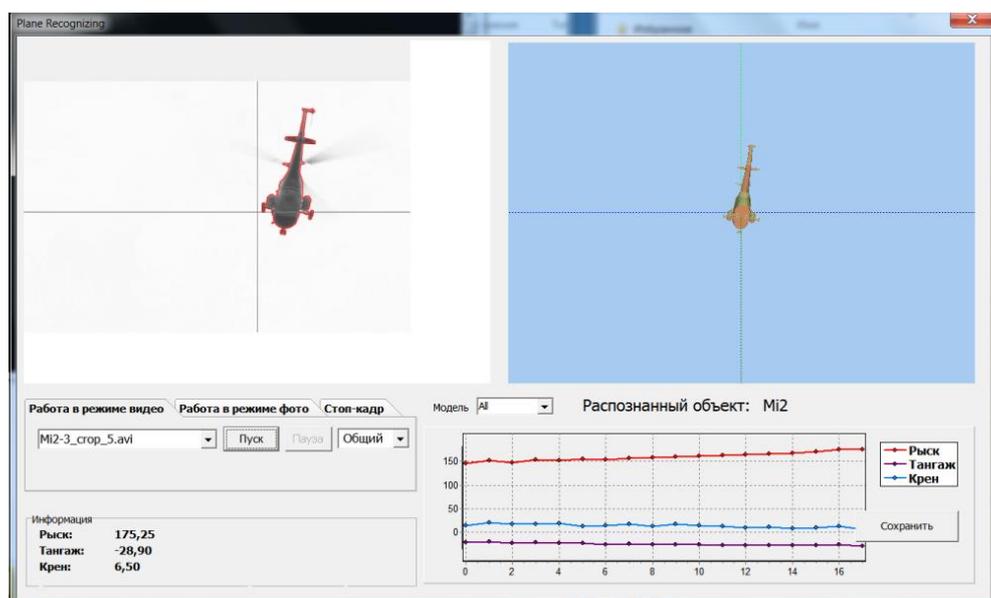


Рис. 3. Вертолет (мгновенные значения углов ориентации: курс (рыскание) $175,25^\circ$; тангаж $-28,90^\circ$; крен $6,50^\circ$)

Таким образом, на основании данных об угловых зависимостях ЭПР типовых ВО и определении углов их ориентации вычисляется текущее значение ЭПР ВО (σ). При этом максимальная дальность обнаружения L типового ВО удовлетворяет соотношению [3, 11]

$$L = L_A \left(\frac{\sigma}{\sigma_A} \right)^{1/4} \cdot \left(\frac{T}{T_A} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

где σ – ЭПР ВО; L_A – дальность обнаружения АЭ с заданными вероятностями правильного обнаружения P_d и ложной тревоги P_F ; T_A – коэффициент пропускания локационной трассы при сопровождении АЭ.

Соотношение (7) используется при равенстве отношений сигнал/шум и уровней ложных тревог P_F , полученных для ВО и АЭ при их обнаружении с помощью ЛД.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод о том, что при получении с помощью наземной ОЭС с ЛД текущей координатной и сигнальной информации о цели и АЭ $[x(t), y(t), z(t), x_A(t), y_A(t), z_A(t)]$ выражение (7) обеспечивает расчет максимальной дальности обнаружения типовой воздушной цели.

Более *точно и корректно* оценивание максимальных ДД ЛД до типовых объектов при существующих и заданных ФМУ проводится с помощью аналитических моделей лазерных полей и верифицированных ИММ функционирования ОЭС [3, 6, 7].

Таким образом, в данном разделе статьи были описаны обеспечение и метод оценивания информационных показателей качества ЛД в составе ОЭС при их наземных испытаниях и калибровке.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим проведение натуральных экспериментов и результаты испытаний двух типов ЛД (ЛД1, ЛД2) в составе двух вариантов ОЭС (ОЭС1, ОЭС2).

1. *Объект испытаний – ЛД (ЛД1) ближнего инфракрасного (ИК) диапазона в составе многоканальной ОЭС, включающей ультрафиолетовый, телевизионный (ТВ), а также коротковолновый, средневолновый и длинноволновый ИК-каналы обнаружения и сопровождения ВО.*

Проверка выполнения требований к ЛД1 включает:

- оценку ДД ЛД1 (при МДВ = 20 км) по диффузному объекту с ЭПР = 5 м²;
- оценку ДД ЛД1 (при МДВ = 20 км) по уголкового отражателю с ЭПР = 750 м²;
- контрольное измерение дальности (при МДВ = 10...20 км) до ВО с ЭПР > 5 м².

Проверка выполнения требований к ДД ЛД1 производилась по методу, представленному выше.

Результаты натурального эксперимента.

Метеоусловия: температура $t = 6^\circ\text{C}$; относительная влажность $H = 70\%$; давление $P = 745$ мм рт. ст.; МДВ = 5 км. Сопровождение АЭ осуществлялось до 4,2 км. Угол места был равен 8° . Диаметр АЭ = 0,45 м. Коэффициент отражения оболочки $\rho = 0,6$.

Результаты расчетов

Расчетное значение ЭПР АЭ (1) составляет 0,25 м². Расчетное значение прозрачности атмосферной трассы до АЭ (при проведении измерений) $T_A = 0,44$. Расчетная наклонная дальность L обнаружения типового ВО с ЭПР = 5 м² на высоте $Z = 10$ км с учетом вышеприведенных данных составляет $R = 20,4$ км.

Таким образом, установлен диапазон измеряемых дальностей:

- по диффузному объекту (с ЭПР = 5 м², при МДВ = 20 км) – 0,2...20,4 км;
- уголкового отражателю (с ЭПР = 750 м²) – 0,2...60 км.

В ходе испытаний были получены изображения ВО с ЭПР > 5 м² и с помощью ЛД1 и ОЭС1 измерены координаты (азимут, угол места, дальность) типовых ВО. Один из полученных результатов представлен на рис. 4.



Рис. 4. Сопровождение самолета Boeing 747
(азимут – $016^{\circ}29'29''$; угол места – $027^{\circ}31'55''$; наклонная дальность – 21 810 м)

2. *Объект испытаний* – ЛД (ЛД2) коротковолнового ИК-диапазона в составе многоканальной ОЭС2, включающей ТВ и средневолновые каналы обнаружения и сопровождения ВО.

Цель – оценка ДД ЛД по зачетным ВО различных классов.

Зачетные ВО: самолет гражданской авиации, вертолет.

Условия и порядок проведения испытаний

Проверка проводилась в европейской части России.

Типовые параметры атмосферы: влажность 45 %; давление 55 мм рт. ст.; температура $+10^{\circ}\text{C}$; МДВ = 15...20 км, безоблачно; скорость ветра до 3...4 м/с.

Запуск миниэростатов осуществлялся с расстояния 200 м по направлению ветра.

Было проведено измерение дальности до миниэростатов шарообразной формы (рис. 5) с известными значениями ЭПР в коротковолновом ИК-диапазоне. Захват миниэростата произошел на дальности 220 м. Миниэростат сопровождался в ручном режиме с измерением дальности по ЛД в технологическом режиме. Максимальная ДД ЛД по парящему миниэростату шарообразной формы на основной длине волны составила 4 585 м. При этом угол места данного ВО составил $8,6^{\circ}$.

Натурные измерения дальности сопровождения самолета гражданской авиации и вертолета проводились с использованием ЛД, ИК- и ТВ-каналов ОЭС2.

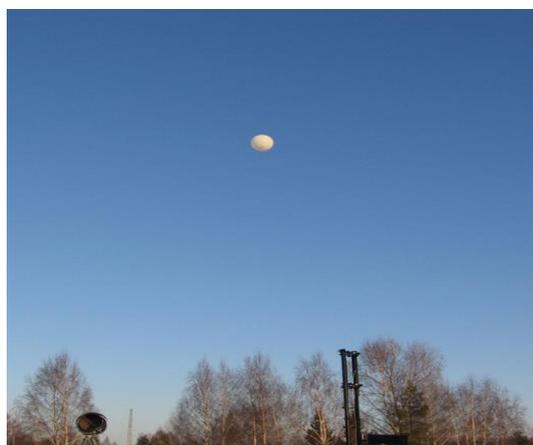


Рис. 5. Аэросталон (миниэростат шарообразной формы)

Результаты расчетов и экспериментов

В таблице приведены расчетные ДД ЛД2 (на основании результатов обработки измерений по АЭ) и дальности работы ЛД2, полученные экспериментально в результате сопровождения ВО. На рис. 6 показан полученный с помощью ОЭС2 кадр сопровождения самолета гражданской авиации.

Расчетные и экспериментальные ДД ЛД2

Воздушный объект	Расчетная максимальная ДД ЛД2, м	Экспериментально полученный диапазон дальностей ЛД2 при сопровождении ВО, м
АЭ	–	220–4 585
Вертолет	18 200	12 924–18 465
Самолет гражданской авиации	25 800	17 246–26 261

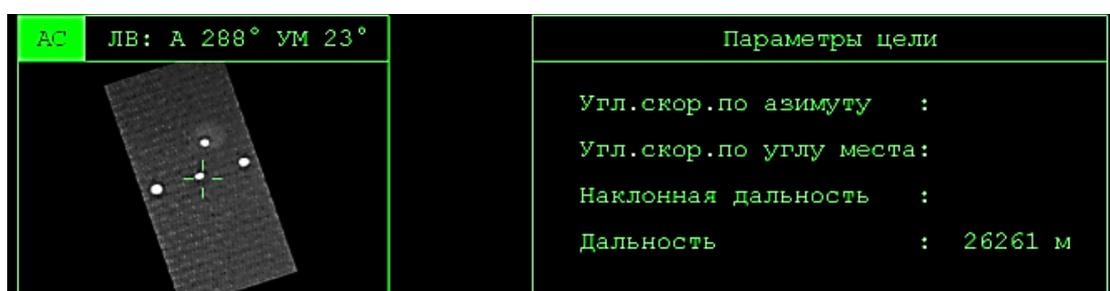


Рис. 6. Кадр сопровождения самолета ОЭС2 (текущая дальность – 26 261 м)

Таким образом, в результате испытаний ЛД1 и ЛД2 было установлено, что полученные результаты соответствуют требованиям к аппаратуре по определению дальности до зачетных ВО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования был разработан метод для испытаний ЛД в составе многоканальных ОЭС. Он основан на определении ЭПР ВО, расчете коэффициентов пропускания локационных оптических трасс, экспериментальных измерениях максимальных дальностей сопровождения АЭ ЛД, определении ракурсов объектов по их двумерным изображениям и расчете ДД дальномеров при локации типовых ВО.

Полученная в результате испытаний информация может быть использована при расчетах на математических моделях ДД ЛД по ВО различных классов, а также по отдельному ВО для различных вариантов его применения и метеоусловий.

Таким образом, технология использования АЭ при испытаниях ОЭС с ЛД оправдала себя. Она полностью обеспечила натурные испытания ЛД на открытых трассах и показала себя при комплексных испытаниях двух различных многоканальных ОЭС.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем признательность нашим коллегам по цеху А.Н. Атапину, О.А. Ивлеву, А.С. Вишнякову, С.А. Искачеву, М.П. Ковальчуку, О.В. Малышеву, Н.А. Марову, А.С. Мирзояну, В.В. Полунадеждину, А.И. Смирнову и Р.А. Хааку за совместный труд и высокий профессиональный уровень работы на холодных, ветреных открытых трассах и в теплых помещениях за компьютерами. Отдельную

благодарность выражаем летчикам аэропорта «Змеево», находящегося в Тверской области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cheok G.S., Stone W.C., Lytle A. Standarts requirements for LADARs // *Laser Radar Technology and Applications X – SPIE*. 2005. V. 5791. P. 250–261.
2. Al-Temeemy A.A., Spencer J.W. Chromatic methodology for laser detection and ranging (ladar) image description // *Optik*. 2015. V. 126. № 23. P. 3894–3900.
3. Калибровка, тестирование и испытания оптико-электронных систем на открытых трассах / И.М. Хмаров [и др.]. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА». 2016. 133 с.
4. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. М.: Логос. 2004. 443 с.
5. Minor J. “Electro-Optics” Electro-Optics Course Textbook. USAF Test Pilot School. Edwards AFB. CA. 2002.
6. Хмаров И.М., Канивец В.Ю. Комплексное моделирование оптико-локационных характеристик летательных аппаратов. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА». 2014. 109 с.
7. Irma 5.0 multi-sensor signature prediction model / M. Owens [et al.] // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2000. V. 3699. P. 249–267.
8. Измерение лазерно-локационных характеристик воздушных объектов / И.М. Хмаров [и др.] // *Труды МАИ*. 2020. № 115. С. 1–18.
9. Youmans D.G. Laser radar vacuum speckle plus atmospheric scintillation: a simple irradiance model // *Laser Radar Technology and Applications V – SPIE*. 2000. V. 4035. P. 287–298.
10. Титов А.Л., Степанов А.В. Методы и средства исследования отражательных характеристик объектов в лазерно-локационном диапазоне. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. 22 с.
11. Kim B.H., Khan D., Choi W., Kim M.Y. Real-time counter-UAV system for long distance small drones using double pan-tilt scan laser radar // *Laser Radar Technology and Applications XXIV – SPIE*. 2019. V. 11005. P. 80–86.
12. Непогодин И.А. Отражательные характеристики и информативность признаков (сигнатур) объектов и фонов в лазерной локации. Казань: Дом печати. 1997. Ч. II. С. 428–457.
13. Jafolla J.C., Reynolds W.R. Bidirectional reflectance measurements for high-resolution signature modeling // *Targets and Backgrounds X: Characterization and Representation*. 2004. V. 5431. P. 184–197.
14. Старченко А.Н. Методическое и аппаратное обеспечение измерений рассеянного лазерного излучения // *Оптический журнал*. 2008. Т. 75. № 12. С. 23–31.
15. Мирзоян А.С., Малышев О.В., Хмаров И.М., Мешков В.В., Шахов С.В. Численные методы определения пространственного положения летательного аппарата на основе 2D-оптических изображений // *Программные продукты и системы*. 2015. № 3 (111). С. 33–41.

Для цитирования: Егужоков Р.А., Хмаров И.М., Шевченко Л.Ф., Мешков В.В., Маркушин Г.Н. Оценка дальности действия лазерных дальномеров в составе оптико-электронных систем при локации воздушных объектов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 4 (16). С. 107–117.

EVALUATION OF THE RANGE OF LASER RANGE FINDERS AS A PART OF OPTO-ELECTRONIC SYSTEMS IN LOCATION OF AERIAL OBJECTS

R.A. EGUZHOKOV¹, I.M. KHMAROV¹, Cand. Sc., L.F. SHEVCHENKO¹, Cand. Sc.,
V.V. MESHKOV², Dr. Sc., G.N. MARKUSHIN³

¹Central Research Institute of Aerospace Forces of the Ministry of Defense
of Russian Federation, 32, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: vse_ki@mail.ru

²Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: common@tstu.tver.ru

³JSC Production Association Ural Optical and Mechanical Plant
named after E.S. Yalamova, 33B, Vostochnaya st., 620100, Yekaterinburg,
Russian Federation, e-mail: geo@uomz.com

The issues of testing laser rangefinders on open routes when locating air objects in the near and short-wave infrared wavelength ranges are considered. A method has been developed and tested that implements the processes of measuring and calibrating signals using aerostandards. The method is based on determining the effective scattering area of airborne objects, calculating the transmission coefficients of radar optical paths, experimental measurements of the maximum tracking distances of aerostandards by laser rangefinders, determining the angles of objects from their two-dimensional images, and calculating the ranges of rangefinders when locating typical airborne objects. The results of tests of two optical-electronic systems with laser rangefinders are presented. The ranges of action of laser rangefinders were evaluated in accordance with the specified requirements.

Keywords: laser range finder, effective scattering area, air object, field measurements, tests, range, aerostandard, multichannel optoelectronic system.

Поступила в редакцию/received: 10.07.2022; после рецензирования/revised: 30.08.2022;
принята/accepted: 12.09.2022

УДК 004.94

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОСКОЛКОВ НА СИСТЕМУ РАЗНЕСЕННЫХ ПРЕГРАД

О.Ю. ФЕДОСОВ¹, канд. техн. наук., Ю.А. ФЕДОСОВ², канд. техн. наук

¹Управление перспективных межвидовых исследований
и специальных проектов Министерства обороны РФ,
119160, Москва, Комсомольский пр., 18, e-mail: olefed78@mail.ru

²Центральный научно-исследовательский институт
Воздушно-космических сил Министерства обороны РФ,
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 32, e-mail: nicrvotver@mail.ru

© Федосов О.Ю., Федосов Ю.А., 2022

Представлена «Модель 1В» – экспериментально-теоретическая модель, предназначенная для расчета основных параметров, характеризующих процессы пробития и разрушения разнесенных преград из различных конструкционных

материалов при действии высокоскоростных осколочных элементов. Принцип разработки «Модели 1В» состоит в установлении системы уравнений и соотношений, описывающих количественные, качественные и логические связи между начальными параметрами и результатами высокоскоростного взаимодействия осколков с системой разнесенных преград.

Ключевые слова: вторичный поток, высокоскоростное воздействие, импульс, моделирование, осколочный элемент, преграда, энергия.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-4-117-127

ВВЕДЕНИЕ

Для создания «Модели 1В» – модели пробития разнесенных преград осколочным элементом (ОЭ) – предполагается установление количественных соотношений между исходными параметрами, влияющими на процесс пробития и разрушения преград (физико-механическими свойствами ОЭ и преград, начальной скоростью и углами встречи ОЭ с преградами, схемой расположения преград и др.), и искомыми результатами воздействия (суммарной толщиной пробитых преград, размерами разрушений в преградах, запреградными характеристиками ОЭ и вторичного потока осколков, импульсом и энергией, поглощаемой i -й преградой при воздействии осколка и т.д.). Получение таких соотношений теоретическими методами весьма затруднительно в силу сложности физических процессов, происходящих при высокоскоростном взаимодействии ОЭ с преградами, а также наличия большого количества исходных параметров, определяющих пробивное действие ОЭ по разнесенным преградам. К тому же в теоретических методах, как правило, используются обобщенные коэффициенты, зависящие от тех же параметров, определяемых экспериментальным путем [1].

Экспериментально-теоретическая разработка «Модели 1В» нужна для расчета основных параметров, характеризующих процессы пробития и разрушения разнесенных преград из различных конструкционных материалов при действии одиночных ОЭ. Она обеспечивает расчет и оценку:

- суммарной толщины пробитых преград и изменения массы, скорости, диаметра основного ОЭ до и после пробития каждой пластины;
- параметров запреградного потока осколков;
- размеров отверстий (пробоин) на каждой пластине;
- импульса и энергии, сообщенной каждой пластине.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 представлены зависимости суммарной толщины пробитых преград $H_{\Sigma}(V_0)$ для однородных пакетов преград из различных материалов: стали 08, стали ЧС4, сплава ВТ14, сплава Д16Т толщиной $h_m = 2,5; 3,5; 2,0; 2,8$ мм (соответственно материалам) при расстоянии между каждой преградой $L = 100$ мм, воздействии стальным ОЭ шаровой формы $m_0 = 1,5$ г под углом $\alpha_0 = 0^\circ$ [2].

Для сравнительного анализа выбирались эксперименты, в которых толщины преград (из разных материалов) были наиболее близки друг другу [2].

На рис. 1 нанесены экспериментальные точки (цифры над ними обозначают номер соответствующего эксперимента). Сплошными линиями нанесены расчетные зависимости $H_{\Sigma}(V_0)$, полученные с помощью разработанной «Модели 1В» для одной массы ОЭ и толщины преград, используемых в экспериментах, при прочих равных условиях. Данные типичные зависимости показывают, что для процесса пробития всех материалов можно выделить четыре характерные зоны (рис. 1).

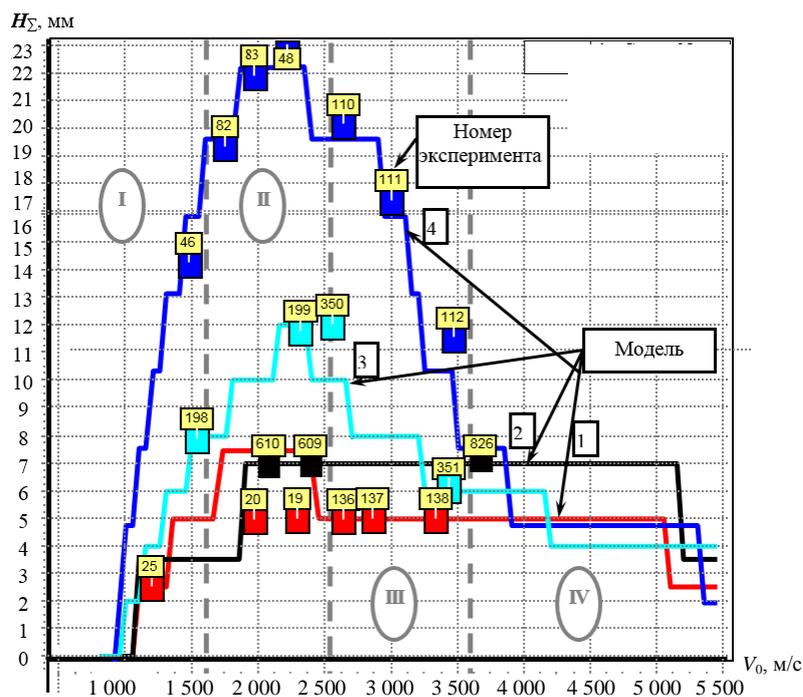


Рис. 1. Зависимость $H_{\Sigma}(V_0)$ для различных пакетов преград: 1 – сталь 08; 2 – сталь ЧС4; 3 – сплав ВТ14; 4 – сплав Д16Т; I–IV – четыре зоны для процесса пробития всех материалов

Первая зона отличается ростом пробивной способности ОЭ с возрастанием скорости воздействия до уровня $V_0 \sim 1900 \pm 200$ м/с. Вторая зона (от скорости $V_0 \sim 1900 \pm 200$ м/с) отличается прекращением роста пробивной способности вследствие начала пластических деформаций ОЭ. В этой зоне ОЭ на преградах деформируется (расплющивается), но не дробится. Третья зона (до $V_0 \sim 4000 \pm 200$ м/с) характеризуется резким снижением пробивной способности осколка вследствие его дробления. При этом чем выше скорость ОЭ, тем на более ранней преграде начинается его дробление. Характерным подтверждением этого могут служить эксперименты 110–112, отмеченные на верхней кривой на рис. 1. В эксперименте 110 ОЭ начинает дробиться лишь на четвертой преграде, в эксперименте 111 – на второй, а в эксперименте 112 ОЭ дробится уже на первой преграде.

Четвертая зона – это зона устойчиво низкой пробивной способности вследствие изменения фазового состояния ОЭ при пробитии первой преграды.

Анализ оценки пробивного действия компактного ОЭ по разнесенным преградам из разных конструкционных материалов показывает следующие моменты [2]:

1) основными параметрами, определяющими пробивную способность, являются начальная скорость и масса компактного ОЭ; скорость начала пластических деформаций $V_{пл}$ материала ОЭ, воздействующего на данную преграду; скорость $V_{др}$ начала дробления ОЭ на этой преграде; степень дробления ОЭ; степень разнесения преград; физико-механические характеристики материала преград;

2) при скорости воздействия ОЭ $V_0 > V_{др}$ его пробивная способность уменьшается вследствие дробления на мелкие фракции, причем чем больше скорость ОЭ (а следовательно, и степень дробления), тем меньше его пробивная способность;

3) степень дробления ОЭ зависит от физико-механических характеристик исследуемых материалов преград и скорости соударения;

4) расчет динамического взаимодействия и параметров процесса пробития целесообразно проводить, рассматривая комбинацию разнесенных преград из различных конструкционных материалов как систему, состоящую из пар преград, последовательно пробиваемых ОЭ.

Степень разнесения преград оказывает наибольшее влияние при скоростях воздействия ОЭ, превышающих $V_{др}$. Она определяет механизм пробития преград (начиная со второй). Влияние степени разнесения индивидуально для каждого конструкционного материала, однако экспериментально установлено, что для всех конструкционных материалов это влияние ограничено некоторым предельным расстоянием между соседними преградами, после которого оно уже не сказывается. Таким образом, задача имеет граничные условия:

а) разнесения нет ($L = 0$);

б) разнесение имеет максимальное эффективное значение ($L = L^*$).

Если преграда находится на небольшом расстоянии от первой, то ее пробитие обусловлено групповым действием фрагментов основного ОЭ, которое эквивалентно действию основного ОЭ с начальной массой m_0 , но с меньшей плотностью, уменьшающейся за счет разлета фрагментов из общего центра масс по мере удаления от первой преграды. С увеличением расстояния между преградами максимальное пробивное действие обусловлено фрагментом наибольшей массы, так как его воздействие и воздействие остального запреградного потока осколков на последующие преграды разнесено по времени. Для того чтобы с физической точки зрения правильно описать процесс пробития разнесенных преград при пластических деформациях ОЭ, необходимо ввести функцию $\gamma_i(V_{zi}, L_i)$, отражающую процесс деформации и дробления осколка на конкретном конструкционном материале, причем эта функция должна удовлетворять граничным условиям, о которых было сказано выше. Функция $\gamma_i(V_{zi}, L_i)$ определяется экспериментально для каждой соударяющейся пары ОЭ и преграды.

Для решения задачи оценки динамического взаимодействия ОЭ с разнесенными преградами из различных конструкционных материалов нужно провести стрельбовые испытания применительно к рассматриваемым материалам и диапазону условий воздействия ОЭ по преградам. На основе результатов стрельб определяются графические или аналитические зависимости, устанавливающие функциональную связь полученных результатов с исходными параметрами. Такие зависимости просты и достаточно надежны и, кроме того, наглядно показывают влияние каждого исходного параметра на процесс пробития и разрушения преград [3].

Основное достоинство «Модели 1В» заключается в том, что для нее нужно небольшое число сравнительно легко определяемых в эксперименте параметров и она довольно просто может быть реализована в существующих программах расчета динамических процессов.

Общая структура компьютерной экспериментально-теоретической «Модели 1В» представлена на рис. 2.

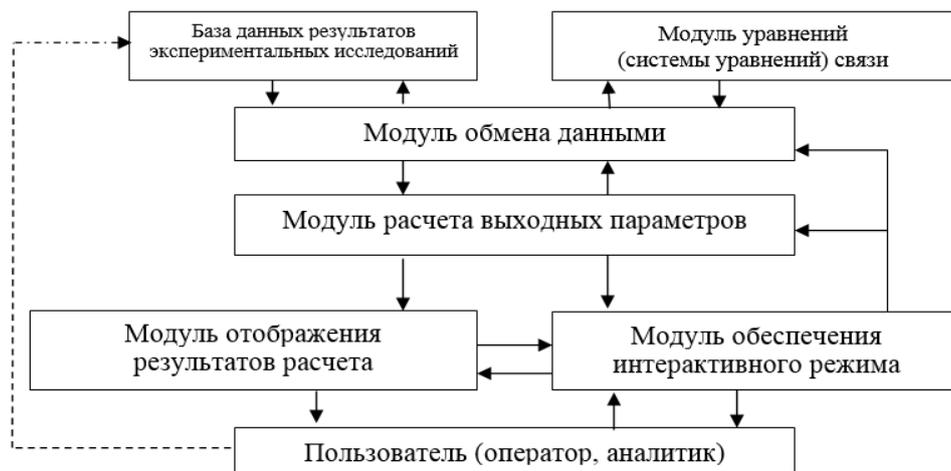


Рис. 2. Общая структура «Модели 1В»

Процесс сквозного пробития пакета разнесенных преград имеет ряд специфических особенностей, в силу которых его моделирование является нетривиальной задачей. В зависимости от скорости удара ОЭ, его материала, угла соударения, толщины экрана и прочностных свойств он может пройти через первый экран практически неповрежденным или же оказаться в раздробленном, расплавленном или частично испаренном состояниях. В связи с этим при разработке экспериментально-теоретической «Модели 1В» учитывали упругое деформирование и пластическое течение, плавление и затвердевание, испарение и конденсацию, кинетику фазовых переходов и химические превращения, изменение микроструктуры материала в процессе разрушения и обратное влияние структурных изменений на физико-механические характеристики и напряженно-деформированное состояние соударяющихся тел.

Из сказанного выше следует, что «Модель 1В» не может быть всеобъемлющей, она строится в условиях заранее оговоренных логических ограничений. Эти ограничения в итоге определяют точность разработанной модели и границы ее применения.

Принцип разработки «Модели 1В» состоит в установлении системы уравнений и соотношений, описывающих количественные, качественные и логические связи между параметрами высокоскоростного взаимодействия осколков с системой разнесенных преград. Главное требование, предъявляемое к модели, заключается в том, чтобы служить средством решения поставленных задач. Для этого необходимо, с одной стороны, обеспечить представительность модели (ее способность отображать свойства системы разнесенных преград полно и точно), а с другой – обеспечить простоту, умеренную сложность модели для ее работоспособности и приемлемого быстродействия. Эти требования противоречивы, поскольку повышение представительности достигается за счет усложнения модели.

На основе требований, предъявляемых к модели расчета процессов пробития разнесенных преград из различных конструкционных материалов, может быть сформулирована представленная ниже физико-математическая задача.

А. Входными переменными параметрами (аргументами) являются:

m_0 – начальная масса ОЭ (в диапазоне от 0,5 до 50 г);

d_0 – диаметр (характерный размер) ОЭ;

V_0 – скорость соударения ОЭ с первой преградой (500–5 000 м/с);

α_i – угол установки i -й преграды по линии стрельбы, а именно угол между нормалью к i -й преграде и линией стрельбы (в диапазоне от нормали ($\alpha_i = 0$) до угла рикошета);

ρ_o – плотность материала ОЭ (материалы: сталь, сплав на основе вольфрама ВНЖ);

K_ϕ – коэффициент формы ОЭ (1,21 для шара; 1,5 для куба);

n – количество преград;

ρ_{mi} ($i = \overline{1, n}$) – плотность материала i -й преграды (материалы: два вида стали, алюминиевый и титановый сплавы, углепластик);

h_i ($i = \overline{1, n}$) – толщина i -й преграды;

L_i – расстояние по линии стрельбы между i -й и $(i + 1)$ -й преградами.

Б. Условия и ограничения.

Схемы разнесения и пространственная ориентация преград произвольны.

Требуется для основных авиационно-космических материалов (стали, углепластика, алюминиевого и титанового сплавов) экспериментов создать математическую модель, позволяющую получить расчетным путем параметры, описывающие процесс пробития разнесенных преград осколком:

m_{zi} – эффективную массу ОЭ после пробития i -й преграды;

V_{zi} – скорость ОЭ после i -й преграды;

φ_{zi} – угол между векторами \vec{V}_{zi+1} и \vec{V}_{zi} ;

d_{zi} – характерный размер ОЭ после пробития i -й преграды;

μ_{pi} (ΔM_i) – суммарную массу вторичного потока после пробития i -й преграды (дефицит массы преграды после ее пробития осколком);

θ_{pi} – угол разлета вторичного потока после пробития i -й преграды;

V_{pi} – скорость движения центра масс вторичного потока за i -й преградой;

D_{pi} – характерные размеры разрушений в i -й преграде;

P_i – импульс, воспринимаемый i -й преградой от воздействия ОЭ;

ΔE_i – энергию, поглощаемую i -й преградой при воздействии осколка.

Таким образом, необходимо получить алгоритмы расчета десяти функциональных зависимостей от десяти заданных аргументов, т.е.

$$f_{pi}(m_o, d_o, V_o, K_\phi, \rho_o, \rho_{mi}, \alpha_i, h_i, L_i, n), \quad i = \overline{1, n}.$$

Разработка «Модели 1В» основывается:

на использовании известных экспериментальных данных и физических закономерностей процессов высокоскоростной деформации;

применении теории планирования экспериментальных исследований, позволяющей при минимальном числе опытов получить максимальную информацию (необходимую в рамках принятых ограничений);

введении необходимых ограничений параметров и условий процессов, позволяющих получить аналитические выражения закономерностей в рамках заданных требований.

Анализ различных подходов [1, 3, 4] показал, что для решения данной задачи наиболее целесообразно построить математическую модель, основанную на использовании соотношений и параметров, характерных для энергетического подхода к оценке процесса высокоскоростного взаимодействия. При этом противоречивые требования достижений высокой точности и приемлемой трудоемкости проводимых расчетов могут быть согласованы за счет упрощения расчетных схем, учитывающих

только основные закономерности протекающих физических процессов, а также введения в математическую модель специальных подстроечных параметров, численные значения которых подбираются при калибровке модели по экспериментальным данным для компенсации принятых упрощений. Таким образом, «Модель 1В» является экспериментально-теоретической и опирается на стрелбовый эксперимент.

Поскольку основным предметом исследования является взаимодействие ОЭ с разнесенными преградами, то вопрос о пробитии одиночной преграды становится ключевым в логической структуре исходного процесса (первая из разнесенных преград должна быть пробита навывлет). При этом методики оценки характерных параметров процесса взаимодействия ОЭ с одиночной преградой будут служить базой при разработке расчетной модели процесса для разнесенных преград [5, 6].

Рассмотрим процесс пробития одиночной преграды ОЭ, основываясь на общефизических законах и оценке энергетических параметров процесса взаимодействия ОЭ с преградой.

В качестве основной характеристики процесса принимаем энергию, поглощаемую преградой при ее пробитии (ΔE). При этом не столь важно, в какие виды энергии она превращается (световую, тепловую, деформации и т.д.). Важна величина энергии, отобранная преградой у ОЭ. Запишем закон сохранения полной энергии для процесса взаимодействия системы «ОЭ – преграда» в виде

$$E_0 = E_3 + E_{\Pi} + \Delta E, \quad (1)$$

где $E_0 = m_0 \cdot V_0^2 / 2$ – энергия осколка до преграды; $E_3 = m_0 \cdot V_3^2 / 2$ – энергия осколка за преградой; $E_{\Pi} = \mu_{\Pi} \cdot V_{\Pi}^2 / 2$ – энергия вторичного потока осколков; m_0 – масса ОЭ; V_0, V_3 – скорость ОЭ до и после преграды; $\mu_{\Pi i} (\Delta M_i)$ – суммарная масса вторичного потока после пробития i -й преграды (дефицит массы преграды после ее пробития осколком); V_{Π} – скорость центра масс вторичного потока.

Закон сохранения импульса по оси стрельбы имеет вид

$$m_0 \cdot \vec{V}_0 = m_0 \cdot \vec{V}_3 + \mu_{\Pi} \cdot \vec{V}_{\Pi} + \vec{P}, \quad (2)$$

где \vec{P} – импульс, воспринимаемый преградой.

Из уравнений (1) и (2) получаем выражение для энергии, поглощаемой преградой:

$$\Delta E = \frac{m_0 \cdot (V_0^2 - V_3^2)}{2} - \frac{[m_0 \cdot (V_0 - V_3) - P]^2}{2 \cdot \mu_{\Pi}}. \quad (3)$$

Величины, которые находятся в правой части уравнения (3), измеряются с достаточно высокой точностью экспериментально (относительная погрешность измерений – в пределах 4 %). Таким образом, получив экспериментально зависимости для исследуемых j -х материалов преград и k -х материалов осколка в виде

$$\Delta E_{kj} = F_{kj}(E_0, K_{\Phi}) \cdot F^*_{kj}(h_1) \cdot F^{**}_{kj}(\alpha_1), \quad (4)$$

где $F_{kj}(E_0, K_{\Phi})$, $F^*_{kj}(h_1)$, $F^{**}_{kj}(\alpha_1)$ – функциональные зависимости влияния параметров осколка, толщины преграды и угла воздействия соответственно, решаем совместно систему уравнений (3) и (4) и получаем выражение для запреградной скорости ОЭ:

$$V_{3kj} = V_0 \cdot f(m_0, d_0, V_0, \alpha_1, h_1, K_{\Phi}). \quad (5)$$

Полученные эмпирические зависимости для запреградной скорости ОЭ позволяют создать алгоритм расчета суммарной толщины H_{Σ} разнесенных преград, пробиваемых осколком. С помощью этого алгоритма выявляются запреградные параметры ОЭ при представлении всей совокупности разнесенных преград как системы, состоящей из пар преград, последовательно пробиваемых осколком. При этом запреградные параметры ОЭ будут являться входными для следующей преграды. Такое построение алгоритма дает возможность проводить расчеты для схем экранирования, состоящих из преград как одного, так и различных материалов.

Блок-схема алгоритма расчета параметров процесса пробития разнесенных преград из конструкционных материалов представлена на рис. 3.

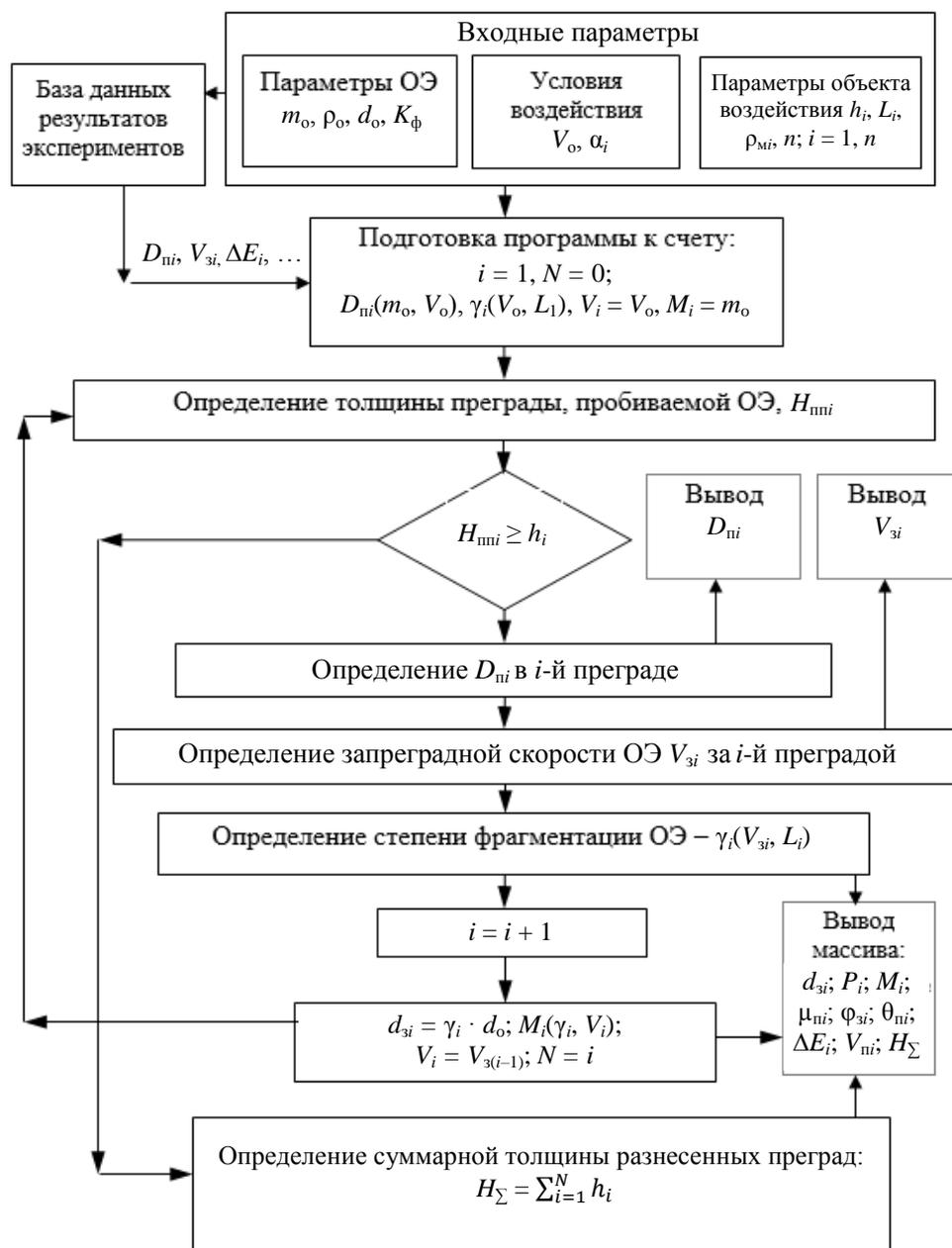


Рис. 3. Блок-схема алгоритма для расчета параметров процесса пробития разнесенных преград ОЭ

Исходными данными для математической «Модели 1В» служат:

параметры осколка $\{m_o, d_o, \rho_o, V_o, K_\phi\}$ – масса, диаметр (характерный размер), плотность, начальная скорость, коэффициент формы ОЭ;

массив параметров преград $\{h_i, \rho_{mi}, \alpha_i, L_i, n\}$ – толщина, плотность, угол установки i -й преграды, расстояние между i -й и $(I + 1)$ -й преградами, число преград.

Искомыми параметрами модели являются характеристики стойкости преград к осколочному воздействию: m_{zi}, V_{zi}, d_{zi} – масса, скорость, характерный размер ОЭ после пробития i -й преграды, а также $\mu_{pi}, V_{pi}, D_{pi}, P_i, \Delta E_i$ – суммарная масса и скорость движения центра масс вторичного потока, характерные размеры разрушений, импульс, энергия, поглощаемая i -й преградой при воздействии осколка, и H_Σ – суммарная толщина пробития разнесенных преград.

Величина H_Σ является не только количественной мерой процесса пробития разнесенных преград, но и важнейшим качественным показателем, наглядно отражающим изменение механизма высокоскоростной деформации.

По алгоритму расчета (рис. 3), если ОЭ, имеющий массу m_o и начальную скорость V_o , способен пробить первую преграду толщиной h_1 (т.е. $h_1 < H_{pi}$), рассчитывается диаметр повреждения в первой преграде. В зависимости, полученные на первом этапе экспериментальных исследований, подставляется вычисленное значение D_{pi} и определяется запреградная скорость ОЭ (V_{zi}). Затем целочисленной переменной N , обозначающей количество пробитых преград, присваивается значение «1», а V_1 – вычисленное значение V_{zi} и начинается расчет параметров ОЭ при пробитии второй преграды, при этом описанный алгоритм расчета рекуррентным образом повторяется до тех пор, пока будет выполняться условие $h_i < H_{pi}$. В случае невыполнения этого условия расчет прекращается и определяется суммарная толщина H_Σ пробитых N преград.

Результат моделирования – вывод массива параметров ($d_{zi}; P_i; M_i; \mu_{pi}; \Delta E_i; V_{pi}; H_\Sigma$). Параметры процесса пробития каждой преграды могут выдаваться таблично или графически, как показано на рис. 4 (пробитие шести преград). Перечень выводимых в таблицу или график параметров может быть изменен в зависимости от потребностей исследования.

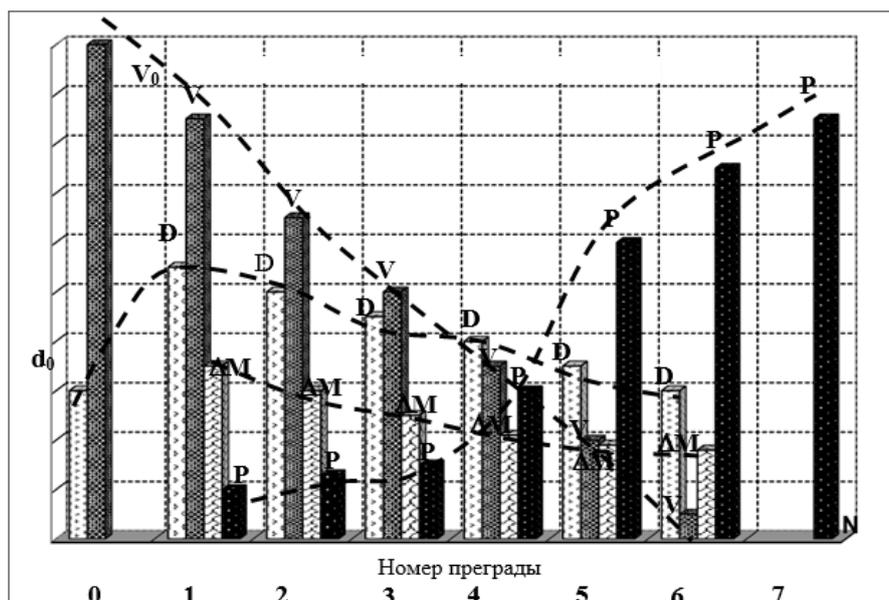


Рис. 4. Параметры процесса пробития шести преград

Расчеты на основе полученного программного комплекса целесообразно проводить при анализе и прогнозировании результатов лабораторных и натуральных экспериментов, их планировании, что позволит существенно сократить количество дорогостоящих экспериментов.

Сравнение данных математического моделирования и экспериментальных исследований показывает, что результаты моделирования удовлетворительно коррелируются с экспериментом.

На рис. 1 видно хорошее совпадение результатов моделирования с результатами экспериментальных исследований для четырех видов исследованных материалов преград во всем заданном диапазоне начальной скорости ОЭ от 500 до 4 000 м/с. Точки на рис. 1 соответствуют результатам экспериментов, а линии представляют собой прогноз результатов, полученных с помощью «Модели 1В».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье была представлена экспериментально-теоретическая «Модель 1В», которая предназначена для расчета основных параметров, характеризующих процессы пробития и разрушения разнесенных преград из различных конструкционных материалов при действии высокоскоростных ОЭ.

Использование «Модели 1В» позволяет обеспечить:

расчет и наглядное отображение расчетных оценок одного или нескольких выходных параметров для заданных в интерактивном режиме входных переменных в соответствии с выбранным режимом отображения;

расчет и наглядное отображение корреляционных зависимостей оценок выходных параметров от входных переменных;

формульное отображение уравнений, на основе которых производятся расчеты по оценке выходных параметров;

выборку из базы данных результатов экспериментальных исследований для наглядного отображения и последующего статистического анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хабибуллин М.В. Численное моделирование взаимодействия высокоскоростного ударника с системой пространственно разнесенных мишеней // *ВАНТ. Серия «Математическое моделирование физических процессов»*. 1997. Вып. 3. С. 18–24.

2. Экспериментальные исследования процессов пробития разнесенных стальных преград при действии высокоскоростных компактных осколочных элементов. НТО о НИЭР «Броня-Т». Тверь: ГУП 2 ЦНИИ МО РФ. 2003. 68 с.

3. Экспериментальные исследования процессов пробития разнесенных преград из алюминиевого сплава Д16Т при действии высокоскоростных компактных осколочных элементов. НТО о НИР «Броня-Т 2МО». Тверь: ГУП 2 ЦНИИ МО РФ. 2002. 151 с.

4. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел / под ред. А.В. Герасимова. Томск: ТГУ. 2007. 572 с.

5. Meshkov V.V., Fedosov Y.A., Filatova N.N. An integrated system for modeling hypervelocity interaction of solids // *Acta Astronautica*. 2021. V. 178. P. 606–615.

6. Иницирующее и зажигательное действие боевых частей зенитных ракетных комплексов: учебное пособие / В.М. Кашин [и др.]; под ред. В.М. Кашина. СПб.: БГТУ. 2009. 244 с.

Для цитирования: Федосов О.Ю., Федосов Ю.А. Моделирование высокоскоростного воздействия осколков на систему разнесенных преград // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2022. № 4 (16). С. 117–127.

**OF HIGH-SPEED IMPACT OF FRAGMENTS
ON A SYSTEM MODELING
OF SPACED BARRIERS**

O.Yu. FEDOSOV¹, Cand. Sc., Yu.A. FEDOSOV², Cand. Sc.

¹Department of Advanced Interspecific Research and Special Projects Ministry of Defense of Russian Federation, 18, Komsomolsky Ave., 119160, Moscow,
Russian Federation, e-mail: olefed78@mail.ru

²Central Research Institute of the Russian Ministry of Defense,
32, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: nicpvotver@mail.ru

The experimental-theoretical model «Model 1B» is presented, designed to calculate the main parameters characterizing the processes of penetration and destruction of spaced barriers made of various structural materials under the action of high-speed fragmentation elements. The principle of developing the «Model 1B» is to establish a system of equations and relations describing quantitative, qualitative and logical connections between the initial parameters and the results of high-speed interaction of fragments with a system of spaced barriers.

Keywords: secondary flow, high-speed impact, pulse, simulation, fragmentation element, barrier, energy.

Поступила в редакцию/received: 17.07.2022; после рецензирования/revised: 30.08.2022;
принята/accepted: 12.09.2022

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Технические науки»

**Научный рецензируемый журнал
№ 4 (16), 2022**

Online ISSN 2687-0029

Редактор С.В. Борисов
Корректор Я.А. Петрова

Дата выхода в свет 30.12.2022

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