

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
№ 1 (17), 2023

Print ISSN 2658-5030
Online ISSN 2687-0029

Тверь 2023

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: ПИ № ФС77-74321 от 19 ноября 2018 года. Индексируется в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

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

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

2.5.3. Трение и износ в машинах

2.8.8. Геотехнология, горные машины.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>Митюрев А.А.</i> Исследование электрической проводимости промежуточной жидкометаллической среды скользящих электрических контактов	5
<i>Митюрев А.А.</i> Некоторые закономерности применения промежуточных жидкометаллических сред в скользящих электрических контактах.....	11

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Аксенов В.В., Бегляков В.Ю., Садовец В.Ю., Пашков Д.А., Осипов Р.С., Измайлов И.Р.</i> Модель взаимодействия геолога и его систем с геосредой. Необходимость реформирования.....	19
<i>Яблонев А.Л., Пашко П.Б.</i> Обоснование конструкции диспергатора для подготовки рабочих жидкостей горных механизированных крепей.....	28

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>Кайченко А.В., Ереценко В.В., Яценко В.В., Благовещенский И.Г.</i> Программно-аппаратный комплекс для автоматического управления процессом подготовки сушильного агента с заданными параметрами температуры и влажности.....	41
<i>Матвеев Ю.Н., Иванов А.В.</i> Использование метода покоординатного спуска для поиска решения задачи целочисленного программирования.....	53
<i>Калабин А.Л., Тарачков М.В.</i> Модель вибрационно-силового выравнивания при упаковке.....	63
<i>Чирков Р.Н., Бахарева О.Н., Лопина Н.П., Бордина Г.Е., Паршин Г.С.</i> Актуальные направления применения машинного обучения в здравоохранении.....	70
<i>Кобринский Б.А.</i> О моделировании переходных состояний организма.....	79
<i>Алехин Т.Ю.</i> Основные направления использования технологий искусственного интеллекта в интересах обеспечения обороны и безопасности государства.....	87
<i>Федосов О.Ю.</i> Обоснование системы критериев зажигания топливных баков осколочными элементами.....	92
<i>Мешков В.В., Филатова Н.Н., Кемайкин В.К.</i> Формирование рабочей выборки для интеллектуальной системы управления с использованием результатов экспериментальных исследований и компьютерного моделирования.....	103

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

<i>Mityurev A.A.</i> Study of electrical conductivity of intermediate liquid metallic medium of sliding electrical contacts.....	5
<i>Mityurev A.A.</i> Some regularities of application of intermediate liquid metallic media in sliding electric contacts	11

TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION MACHINERY

<i>Aksenov V.V., Beglyakov V.Yu., Sadovets V.Yu., Pashkov D.A., Osipov R.S., Izmailov I.R.</i> A model of interaction of a geokhod and its systems with the geo-environment. The need for reformatting.....	19
<i>Yablonev A.L., Pashko P.B.</i> Justification of the design of a dispersant for the preparation of working liquids of mining powered supports	28

INFORMATICS, COMPUTER FACILITIES AND MANAGEMENT

<i>Kaychenov A.V., Ereshchenko V.V., Yatsenko V.V., Blagoveshchensky I.G.</i> Hardware and software complex for automatic control of the drying agent preparation process with preset temperature and humidity parameter.....	41
<i>Matveev Yu.N., Ivanov A.V.</i> Usage of coordinate descent algorithm in search of a solution to an integer programming problem.....	53
<i>Kalabin A.L., Tarachkov M.V.</i> Alignment model during packing using vibration force... ..	63
<i>Chirkov R.N., Bachareva O.N., Lopina N.P., Bordina G.E., Parshin G.S.</i> Current areas of application of machine learning in health care.....	70
<i>Kobrinsky B.A.</i> On simulation of transient states of the organism.....	79
<i>Alekhin T.Y.</i> The main directions of technology use artificial intelligence in the interests of ensuring the defense and security of the state.....	87
<i>Fedosov O.Yu.</i> Justification of the system of criteria for igniting fuel tanks with fragmentation elements.....	92
<i>Meshkov V.V., Filatova N.N., Kemaykin V.K.</i> Formation of a training sample for an intelligent control system using the results of experimental research and computer modeling.....	103

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.891: 621.313.04

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СРЕДЫ СКОЛЬЗЯЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

А.А. МИТЮРЕВ, канд. техн. наук

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

© Митюрёв А.А., 2023

Приведено описание конструкции шестипозиционного стенда из моделей жидкометаллических контактов (ЖМК) П. Клауди с целью исследования промежуточных жидкометаллических сред на основе галлия и его эвтектических сплавов для скользящих электрических контактов. Стенд позволяет определять переходное электрическое сопротивление контакта жидких металлов с основными электротехническими материалами (медь, латунь Л63, никель, сталь 12Х18Н10Т и др.) при температуре 20...250 °С. Предложена методика расчета удельного переходного сопротивления контакта жидкий металл – твердый электрод. Экспериментально доказаны целесообразность и эффективность для ЖМК предварительной механической обработки поверхностей твердых контакт-деталей под слоем жидкого металла.

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

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-1-5-10

ВВЕДЕНИЕ

Электрические скользящие контакты являются распространенным видом фрикционных узлов и сложной трибосистемой. К этим контактам предъявляют ряд специфических, характерных только для них требований, связанных с их назначением и условиями эксплуатации. Достижение высокой электрической проводимости и низкого переходного электрического сопротивления выступает одной из главных задач обеспечения надежности и эффективности электроконтактных соединений, особенно в аппаратах по коммутации больших по величине токов (десятки и сотни килоампер), которые в настоящее время широко применяются в промышленном электролизе для производства важнейших металлов (алюминия, магния и др.), газов (водорода, кислорода, хлора и пр.), в униполярных генераторах, ускорителях элементарных частиц, сверхпроводящих системах и др. Этим объясняется возросший интерес к новым композиционным материалам, получаемым методами порошковой металлургии. Указанные материалы представляют собой прочный и износостойкий твердометаллический каркас, пропитанный либо твердым электроконтактным материалом (например, медью) [1, 2], либо жидким металлом (допустим, галлием или эвтектическими сплавами на его основе).

Как показали предварительные исследования [3–10] галлийсодержащих промежуточных сред для жидкометаллических контактов (ЖМК), контакт жидкий металл – поверхность твердой детали во многом определяет основные электрические функциональные и эксплуатационные характеристики реального электрического аппарата. Важность этой составляющей возрастает при использовании ЖМК в качестве скользящего контакта при граничном трении, так как без надежной работоспособности именно электрического контакта может быть потеряно функциональное назначение всей электрической трибосистемы в целом. Следовательно, для проектирования и эксплуатации скользящих электрических контактов с применением промежуточных жидкометаллических (ЖМ) сред или скользящих композиционных ЖМК очевидно, что совершенно недостаточно изучения только фрикционных характеристик галлийсодержащих материалов при жидкостном или граничном трении [11–13]. Поэтому целью настоящей работы было исследование особенностей электрической проводимости границы жидкий металл – поверхность твердой контакт-детали с созданием методики расчета удельного переходного электрического сопротивления различных по соотношению материалов контактов жидкий металл – твердый электрод.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Особенности электрической проводимости ЖМК изучались на классической модели П. Клауди [3, 4], представляющей собой два разделенных жидким металлом твердометаллических цилиндра с фиксированными размерами твердого и жидкого электрических проводников.

По схеме П. Клауди был разработан шестипозиционный стенд ЭК-6КМ (рис. 1) для изучения временной зависимости удельного переходного сопротивления χ , то есть переходного сопротивления единицы площади поверхности контакта жидкий металл – твердый электрод.

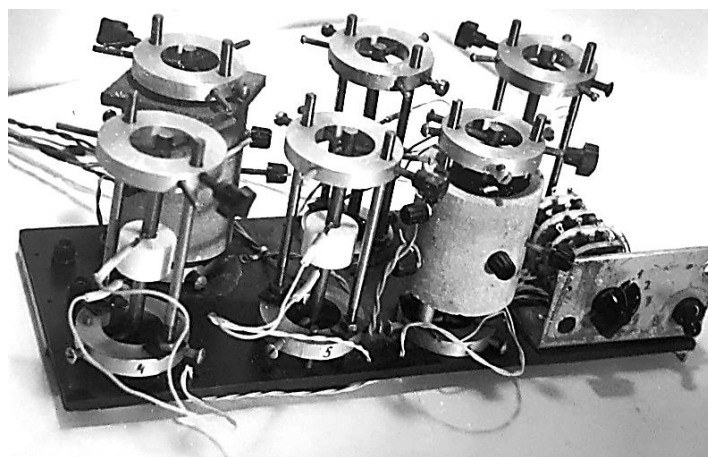


Рис. 1. Внешний вид стенда ЭК-6КМ

Стенд ЭК-6КМ состоит из шести моделей ЖМК, закрепленных на общей изоляционной станине и электрически соединенных последовательно. Каждая модель ЖМК включает в себя цилиндрические образцы диаметром $d = 6$ мм (нижний образец на схеме обозначен цифрой 1, верхний – 2) (рис. 2). Нижний образец закреплен тремя центровочными винтами в нижней обойме 3, к которой подведен токовый провод. В верхней части нижнего образца прессовой посадкой закреплено изоляционное кольцо 4 из фторопласта. Верхний образец закреплен тремя центровочными винтами в верхней обойме 5, которая установлена на двух стойках 6 с подведением к одной из них

ответного токового провода. Изоляционные втулки 7 электрически разделяют верхнюю и нижнюю обоймы. К верхнему и нижнему образцам на фиксированном расстоянии $\ell_1 = \ell_2 = 4$ мм, которое контролировалось с помощью микроскопа, подведены потенциальные провода, ограничивающие длину твердометаллических электрических проводников. Верхний образец фиксировался на скользящую посадку в изоляционном кольце 4 при монтаже модели ЖМК после заливки в отверстие кольца жидкого металла 8. Высота $L = 12$ мм изоляционного кольца контролировалась микрометром.

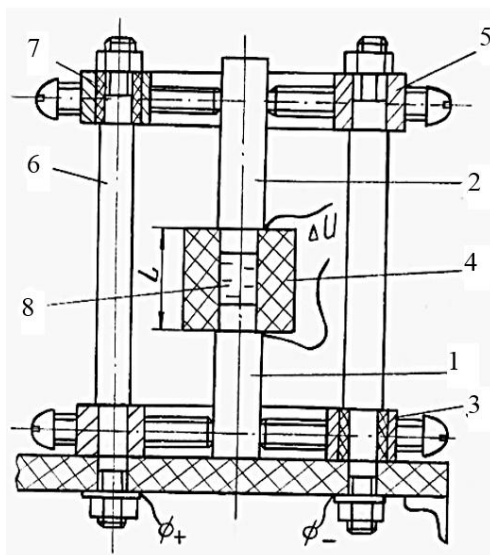


Рис. 2. Схема модели ЖМК П. Клауди на стенде ЭК-6КМ

Длина $\ell_{жм}$ ЖМ-проводника после монтажа каждой модели ЖМК определяли по выражению

$$\ell_{жм} = L - (\ell_1 + \ell_2).$$

На стенде ЭК-6КМ предусмотрены электрические нагреватели с рабочим диапазоном температур 20...250 °С. Для исследований при повышенных температурах фторопластовые изоляционные кольца должны быть заменены на керамические из-за сильной деформации первых при нагревании.

При пропускании постоянного тока в диапазоне $I = 1...5$ А на каждой модели ЖМК определялось контактное падение напряжения ΔU . Компенсацию термо-ЭДС осуществляли проведением измерений при прямом и обратном направлениях тока.

Исследовали основные электротехнические материалы (медь, латунь Л63, никель, сталь 12Х18Н10Т) в контакте с галлием и эвтектиками на его основе.

Удельное переходное сопротивление χ_i одного контакта жидкий металл – твердый электрод находили по формуле

$$\chi_i = R_{пер i} \cdot A_n,$$

где $R_{пер i} = \frac{R_{пер i}^{общ}}{2}$ – переходное сопротивление одного контакта жидкий металл – твердый электрод ($R_{пер i}^{общ}$ – общее переходное сопротивление i -й модели ЖМК); $A_n = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ – номинальная площадь круглого контакта жидкий металл – твердый электрод.

Общее переходное сопротивление $R_{пер\ i}^{общ}$ рассчитывали по формуле

$$R_{пер\ i}^{общ} = R_k - (R_1 + R_2) - R_{жм},$$

где $R_k = \frac{\Delta U}{I}$ – контактное сопротивление i -й модели ЖМК; $R_{1,2} = \frac{4 \cdot \rho_{ТВ} \cdot \ell_{1,2}}{\pi \cdot d^2}$ – собственное омическое сопротивление твердометаллических проводников из образцов 1 и 2 ($\rho_{ТВ}$ – удельное сопротивление материала твердометаллических проводников); $R_{жм} = \frac{4 \cdot \rho_{жм} \cdot \ell_{жм}}{\pi \cdot d^2}$ – собственное омическое сопротивление ЖМ-проводника ($\rho_{жм}$ – удельное сопротивление материала ЖМ-проводника) [5, 6, 10].

Тогда удельное переходное сопротивление χ_i одного контакта жидкий металл – твердый электрод можно найти по выражению

$$\chi_i = \frac{\pi \cdot d^2}{8 \cdot I} \cdot \Delta U - \frac{\rho_{ТВ} \cdot (\ell_1 + \ell_2) + \rho_{жм} \cdot \rho_{жм}}{2}.$$

На основании этого выражения по шести моделям ЖМК на стенде ЭК-6КМ можно определить среднее значение удельного переходного сопротивления χ различных по соотношению материалов контактов жидкий металл – твердый электрод:

$$\chi = \frac{1}{6} \sum_1^6 \chi_i.$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования позволили выявить некоторые пути управления процессами на границе жидкого и твердого металлов с целью уменьшения их влияния на электрические свойства ЖМК. Было отмечено, что проведение и совершенствование мероприятий по предварительной подготовке контактирующей поверхности твердых контакт-деталей под слоем жидкого металла позволяет уменьшить переходное сопротивление $R_{жт}$ в ЖМК до 67 %, в то время как последующие внешние воздействия на ЖМК за счет повышения температуры увеличивает $R_{жт}$ до 16 %, а за счет временного фактора уменьшает $R_{жт}$ до 40 %, то есть относительно неблагоприятным может считаться только температурное воздействие.

Уменьшение переходного сопротивления $R_{жт}$ со временем доказывает, что ресурсы предварительной подготовки контактирующей поверхности твердых контакт-деталей под слоем жидкого металла перед организацией ЖМК окончательно не исчерпаны и могут продолжать совершенствоваться. Предполагается, что удаление инородных слоев с твердой поверхности электрического контакта под слоем жидкого металла в определенной степени препятствует прямому воздействию окружающей среды на границу раздела двух фаз и может существенно увеличить проводимость контакта.

Экспериментальное исследование существующих методов обработки твердых поверхностей под слоем жидкого металла выявило невысокую их эффективность и привело к выводу, что существенное уменьшение переходного сопротивления $R_{жт}$ с сохранением физико-механических свойств материалов, составляющих ЖМК, и с минимальными изменениями микрогеометрии поверхности твердой контакт-детали может быть достигнуто в процессе обработки контактной поверхности под слоем жидкого металла со снятием микростружки. Это было реализовано на образцах стенда ЭК-6КМ (таблица).

Значения сопротивления ЖМК до и после обработки со снятием микростружки под слоем жидкого металла (числитель – до, знаменатель – после обработки)

Материалы ЖМК	Cu-Ga-Cu	Л63-Ga-Л63	12X18H10T-Ga-12X18H10T
Теоретическое омическое сопротивление $R_{теор}$, 10^{-6} Ом	42,10±5,47	57,41±5,17	58,63±5,27
Экспериментальное сопротивление $R_{эксп}$, 10^{-6} Ом	$\frac{42,93+9,19}{41,96±3,18}$	$\frac{342,17+51,83}{56,86±6,75}$	$\frac{2961,64+737,16}{481,00±87,00}$
Удельное переходное сопротивление χ , 10^{-10} Ом·м ²	$\frac{0,116+0,008}{\rightarrow 0}$	$\frac{0,040+0,006}{\rightarrow 0}$	$\frac{59,1+8,9}{1,25\mp 0,10}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уменьшение удельного переходного сопротивления контакта жидкий металл – поверхность твердой контакт-детали до значений, близких к нулевым, показало целесообразность и эффективность предварительной обработки поверхностей твердых контакт-деталей со снятием микростружки под слоем жидкого металла для скользящих электрических контактов и электрокоммутирующих устройств, основанных на использовании промежуточных ЖМ-сред.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в тесном сотрудничестве с коллективом кафедры прикладной физики Тверского государственного технического университета. Выражаем отдельную благодарность профессору, доктору технических наук Измайлову Владимиру Васильевичу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства материала, содержащего тугоплавкие компоненты. Композит медь – карбид хрома // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 2 (10). С. 15–20.
2. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства материала, содержащего тугоплавкие компоненты. Композит медь – карбид вольфрама // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 3 (11). С. 5–11.
3. Klaudy P. Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten von Flüssigkeitskontakten // *Elektrotechnische Zeitschrift*. 1955. V. 76. № 15. S. 525–532.
4. Klaudy P. Ein neuer Flüssigkeitsrollkontakt und sein möglich Verwendung im Hochleistungselektromaschinenbau // *Elektrotechnik und Maschinenbau*. 1972. V. 89. № 11. S. 440–445.
5. Дегтярь В.Г., Вячис В.В. Жидкометаллические контакты. Обзорная информация. М.: Информэлектро. 1980. 64 с.
6. Дегтярь В.Г., Нестеров Г.Г. Контактные коммутирующие устройства электрических аппаратов низкого напряжения. М.: ВИНТИ. 1980. Т. 2. 100 с.
7. Митюрёв А.А. Изучение переходного контактного электросопротивления жидкометаллических контактов. *Фрикционный контакт деталей машин. Сборник научных трудов*. Калинин: КПИ. 1989. С. 69–75.

8. Митюрёв А.А. Фрикционные и электрические характеристики жидкометаллических контактов при граничном трении. Дисс. ... канд. техн. наук. Тверь. 1992. 253 с.
9. Дегтярь В.Г. Жидкометаллические контакты и контактные устройства в современных условиях. *Электрические контакты-2002: Сборник докладов международной конференции*. СПб. 2002. С. 166–172.
10. Беляев В.Л. Особенности работы и конструкции многоамперных электрических аппаратов. СПб.: СЗТУ. 2005. 274 с.
11. 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.
12. 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.
13. Guo J., Cheng J., Tan H., Zhu SY., Qiao ZH., Yang J., Liu W. Ga-based liquid metal: A novel current-carrying lubricant // *Tribology International*. 2019. V. 135. P. 457–462.
14. 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.

Для цитирования: Митюрёв А.А. Исследование электрической проводимости промежуточной жидкометаллической среды скользящих электрических контактов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 1 (17). С. 5–10.

STUDY OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF INTERMEDIATE LIQUID METALLIC MEDIUM OF SLIDING ELECTRICAL CONTACTS

A.A. MITYUREV, Cand. Sc.

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

The description is given of the design of a 6-position stand contained the models of liquid-metal contacts (LMC) by P. Claudi for the study of intermediate liquid-metal media based on gallium and its eutectic alloys for sliding electrical contacts. The stand allows to determine the transition electrical resistance of the contact of liquid metals with basic electrical materials (copper, brass L63, nickel, 12Kh18N10T steel, etc.) in the temperature range 20...250 °C. A method for calculating the specific contact resistance of a liquid metal–solid electrode contact is proposed. The expediency and efficiency of preliminary mechanical treatment of surfaces of solid contact parts under a layer of liquid metal has been experimentally proven.

Keywords: sliding electrical contacts, liquid metal contact, boundary friction, wear, gallium, eutectic alloy, transient electrical resistance.

Поступила в редакцию/received: 27.07.2022; после рецензирования/revised: 08.09.2022;
принята/accepted: 15.09.2022

Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 1 (17), 2023

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СРЕД В СКОЛЬЗЯЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТАХ

А.А. МИТЮРЕВ, канд. техн. наук

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

© Митюрёв А.А., 2023

Приведено описание конструкции установки на базе прибора для измерения микротвердости ПМТ-3 с целью исследования фрикционных и электрических характеристик скользящих контактов с промежуточной жидкометаллической (ЖМ) средой для электрических машин и аппаратов. Установка позволяет оценить фрикционную устойчивость ЖМ-покрытия при относительном сдвиге твердых контакт-деталей, определять контактное электрическое сопротивление промежуточных ЖМ-сред в диапазоне температур 20...250 °С. Проведен сравнительный анализ возможности применения для скользящих электрических контактов образованных на твердых контакт-деталях различными способами ЖМ-покрытий. Доказано преимущество ЖМ-покрытия на основе галлия и его эвтектических сплавов, полученного при механической обработке твердой поверхности контакт-детали под слоем жидкого металла.

Ключевые слова: скользящий электрический контакт, трение, изнашивание, жидкометаллический контакт, галлий, эвтектический сплав, контактное сопротивление.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-1-11-18

ВВЕДЕНИЕ

Поиск инновационных технических решений для современной энергетики высоких мощностей, особенно для многоамперных электрических машин и аппаратов, разработка перспективных материалов и устройств, работа которых базировалась бы на новых принципах действия, вызвало усиление внимания к жидкометаллическим контактам (ЖМК). Эти контакты в ряде случаев позволяют существенно снизить или полностью заменить использование дефицитного серебра в производстве силовых контактных узлов, значительно (до 10 раз) уменьшить в них величины контактного нажатия, в целом упростить конструкции электрических аппаратов, перейдя на другие, технически более эффективные схемы коммутации огромных по величине (до 200 кА) токов, широко применяемых в настоящее время металлургическом и химическом производствах, сложнейшем оборудовании сверхпроводящих систем и ускорителей элементарных частиц, мощных жидкометаллических (ЖМ) насосах и реостатах, робототехнике, 3D-принтерах, атомной и аэрокосмической технике [1].

Несмотря на достигнутые в синтезе материалов для ЖМК успехи и очевидные эксплуатационные преимущества ЖМК (малое и стабильное переходное электрическое сопротивление, хорошие возможности охлаждения, не подвержены свариванию при больших токах и температурах, отсутствие вибраций), производство контактных устройств на их основе ограничено из-за отсутствия исследований, посвященных трению, изнашиванию и электрической проводимости таких контактов при граничном трении, то есть взаимодействию твердых контакт-деталей через промежуточную

ЖМ-среду, и изучению фрикционных и электрических характеристик самой ЖМ-среды и их взаимного влияния.

Электрический контакт твердых контакт-деталей через промежуточную ЖМ-среду можно представить как синтез традиционного твердометаллического (ТМ) контакта Р. Хольма (рис. 1а) [2], работающего без промежуточной электропроводящей смазки (для его нормальной работы требуется определенное контактное нажатие (нагрузка) N), и классического ЖМК П. Клауди [3–5], где ТМ-элементы вдоль всей своей контактирующей поверхности разделены жидким металлом с наличием (рис. 1б) и отсутствием (рис. 1в) инородных слоев в виде окисных пленок и интерметаллических соединений на твердых контакт-деталях (в этом ЖМК необходимость в контактном нажатии N отсутствует). В таком комбинированном электрическом контакте (рис. 1г) взаимодействующие поверхности ТМ-элементов на наибольшую высоту микронеровностей профиля R_{max} смочены жидким металлом, который удерживается в микро-впадинах ван-дер-ваальсовыми силами и силами поверхностного натяжения [6]. После приложения контактной нагрузки N осуществляются механический контакт вершинами микронеровностей и полное заполнение межконтактного зазора жидким металлом. Перенос энергии происходит через пятна ТМ-контакта на вершинах микронеровностей и контакт остальной поверхности ТМ-элементов с жидким металлом в межконтактном зазоре. Существующие технологии смачивания жидкими металлами и предварительной обработки контактных ТМ-поверхностей позволяют избегать образования инородных слоев, что делает технически возможным прохождение электрического тока, практически равномерно распределяемого по всей контактной поверхности (рис. 1в, г).

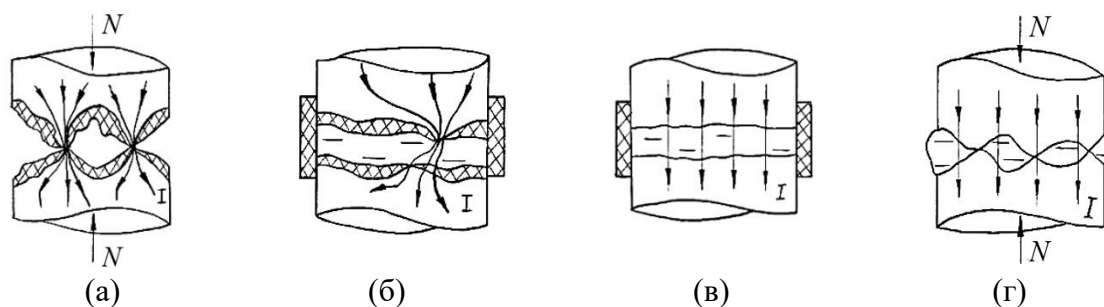


Рис. 1. Модели проводимости электрических контактов: твердометаллического по Р. Хольму (а); ЖМК по П. Клауди с наличием инородных слоев на твердых контакт деталях (б); ЖМК по П. Клауди с отсутствием инородных слоев на твердых контакт деталях (в); комбинированного с промежуточной ЖМ-средой (г)

Было высказано предположение, что при проведении качественной предварительной подготовки контактных ТМ-поверхностей под слоем жидкого металла качество получаемого ЖМ-покрытия будет обеспечивать надежный фрикционный и электрический контакт твердых контакт-деталей через промежуточную ЖМ-среду, которая, помимо существенного уменьшения контактного электрического сопротивления, будет выполнять функции смазки по снижению трения и устранению схватывания между контакт-детальями, а роль контактной нагрузки N в механизме электрической проводимости в комбинированном ЖМК может быть незначительной, несмотря на наличие дискретного контакта ТМ-микронеровностей [6–9]. Поэтому в настоящей работе ставилась цель сравнить различные методы получения промежуточных ЖМ-сред между ТМ-контакт-детальями с точки зрения возможности и целесообразности применения в скользящих электрических контактах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения исследований фрикционных и электрических характеристик скользящих контактов с промежуточной ЖМ-средой был разработан стенд ПМТ-3ЭЛ на базе прибора для измерения микротвердости ПМТ-3, в котором алмазная пирамидка для моделирования единичной микронеровности твердой контакт-детали была заменена держателем сферического зонда из вольфрама, инертного к воздействию жидкого галлия и эвтектических сплавов на его основе (рис. 2).

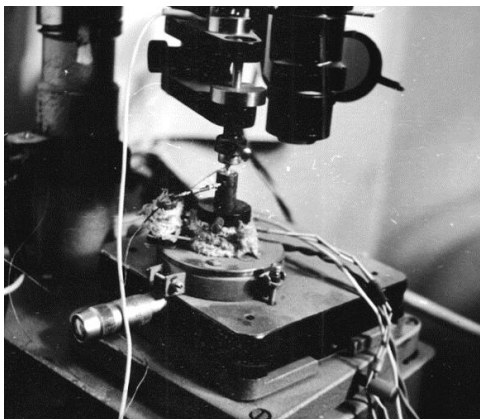


Рис. 2. Контактный узел стенда ПМТ-3ЭЛ

Применение прибора ПМТ-3 позволило обеспечить с высокой точностью заданное усилие нажатия на зонд в диапазоне $N = 5 \dots 200$ г с помощью комплекта гирь из комплектации прибора, а также контролируемый сдвиг зонда при контакте с плоским ТМ-образцом с помощью штатного механизма перемещения стола прибора. Микроскоп прибора давал возможность наблюдать состояние поверхности ТМ-образца с ЖМ-покрытием после сдвига зонда. Держатель ТМ-образца был снабжен нагревателем, что дало возможность проводить исследования при температурах до 250 °С. Измерения контактного сопротивления R_k осуществлялись методом вольтметра-амперметра при постоянном измерительном токе $I = 10; 100; 1000$ мА и компенсацией термо-ЭДС во время испытаний при повышенных температурах путем изменения полярности зонда.

Принципиальная схема стенда ПМТ-3ЭЛ изображена на рис. 3. Измерительный узел для исследования фрикционных и электрических характеристик контакта через промежуточную ЖМ-среду состоял из держателя 1 алмазной пирамиды, в котором размещалась обойма 2 вольфрамового зонда 3 диаметром $d = 2$ мм, держателя 4 ТМ-образца 8, электрически изолированного от стола 6 прибора ПМТ-3 прокладкой 7. Токковый провод 5 был подведен к держателю, второй токковый провод (не показан) крепился к корпусу нагружающего устройства. Контактное падение напряжения ΔU снималось с помощью потенциальных проводов 9 и 10.

На стенде ПМТ-3ЭЛ исследовались следующие методы получения ЖМ-покрытия:

- гальваническое осаждение галлия на твердую контакт-деталь;
- использование материала-посредника (например, олова, цинка), хорошо взаимодействующего с галлием;
- смачивание жидким металлом ювенильной поверхности;
- механическая обработка твердой контакт-детали под слоем жидкого металла (например, скребком, скальпелем, надфилем), предложенная П. Клауди [2, 3] и В.Г. Дегтярем [7].

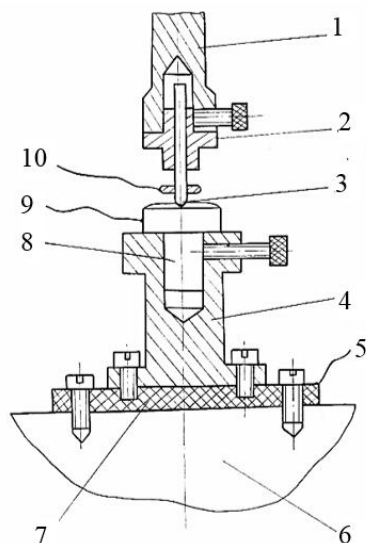


Рис. 3. Схема станда ПМТ-3ЭЛ

Гальваническое осаждение галлия производилось из сульфатного электролита. В состав применяемого электролита входили хлорид галлия 30...50 г/л и сульфаминовая кислота 100...150 г/л. Кислотность электролита рН доводилась до 2...2,5 аммиаком. В качестве анода использовалась платина. Режим осаждения: катодная плотность тока 20...120 А/дм², температура 25 °С, скорость осаждения до 7 мкм/мин [8].

В качестве металла-посредника перед нанесением эвтектик галлия применялось олово. Лужение проводилось с предварительной очисткой образцов после их протачивания на токарном станке: последовательно промывали контактную поверхность бензином, ацетоном, этиловым техническим спиртом и протирая хлопчатобумажной тканью. Для лучшего взаимодействия галлия и его эвтектик с контактной поверхностью и уменьшения остатков флюса использовалась выдержка образцов с ЖМ-покрытием при температуре 250 °С, что выше $T_{пл}$ олова.

Режимы смачивания жидким металлом варьировались от простейшей зачистки ТМ-образцов наждачной бумагой и последующей промывки растворителями до обработки контактных поверхностей под слоем кипящего при температуре 80 °С флюса (30 % канифоли, 70 % технического спирта). Остатки флюса удалялись промывкой бензином и протиркой хлопчатобумажной тканью. Нанесение жидкого металла осуществлялось окунанием в ванну с растиранием стеклянной палочкой.

Механическая обработка скальпелем твердых контактных поверхностей под слоем жидкого металла проводилась после предварительной абразивной зачистки образцов наждачной бумагой и шлифовальными пастами с последующей промывкой и обезжириванием в органических растворителях.

Для исследования использовались ТМ-образцы из типичных электротехнических материалов: меди, никеля, латуни Л63 и ЛС59-1. Указанные образцы представляли собой цилиндры высотой и диаметром 20 мм.

В качестве промежуточной ЖМ-среды в контактах применялись жидкий галлий (Ga, $T_{пл} = 29,8$ °С), эвтектика GI (77,5 % Ga – 22,5 % In; $T_{пл} = 15,8$ °С), эвтектика GIS (62 % Ga – 25 % In – 13 % Sn; $T_{пл} = 10,3$ °С) (указаны проценты по массе).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты сравнения на стенде ПМТ-3ЭЛ электрического контактного сопротивления ЖМК как одного из критериев возможности применения галлия и его эвтектических сплавов в скользящих электрических контактах при различных способах образования ЖМ-покрытия на твердых контакт-деталях при двадцатипятикратных измерениях представлены в табл. 1.

Высокое контактное сопротивление R_k при гальваническом методе нанесения галлия на твердый образец контакт-детали объясняется попаданием в ЖМ-покрытие части электролита из раствора. Последующая промывка контактных поверхностей в свежеприготовленном расплаве жидкого металла требуемого эффекта последующего снижения R_k не дает.

Большой диапазон значений контактного сопротивления R_k при лужении получен из-за того, что вредное воздействие остатков флюса в ЖМ-покрытии удается частично нейтрализовать нагревом и выдержкой образцов при температуре, которая выше температуры плавления металла-посредника (олова).

Таблица 1. Зависимость электрического сопротивления ЖМК от способа получения ЖМ-покрытия (для пары: образец (плоскость) – медь; контроlobразец (сфера, $d = 2$ мм) – вольфрам)

Способ получения ЖМ-покрытия	Технология подготовки поверхности образца и контроlobразца	Условия эксперимента	Контактное сопротивление R_k , 10^{-3} Ом
1	2	3	4
1. Без ЖМ-среды (для справки)	1.1. Без покрытия жидким металлом. Очистка – наждачная бумага, промывка ацетоном, спиртом, протирка хлопчатобумажной тканью	$N = 20$ г; $I = 0,1$ А; $T = 20$ °С	296 ± 171
	1.2. Образец покрыт оловом (лужение). Очистка по п. 1.1		584 ± 389
2. Гальванический	2.1. Образец гальванически покрыт Ga	$N = 20$ г; $I = 0,1$ А; $T = 30$ °С	729 ± 244
	2.2. Образец после осаждения Ga промыт в жидком Ga		217 ± 52
3. Лужение (образец после предварительного нанесения олова покрыт эвтектикой GI; контроlobразец покрыт эвтектикой GI)	3.1. Очистка по п. 1.1	$I = 0,01$ А; $T = 20$ °С; $N = 10$ г	$12,0 \pm 6,6$
		$N = 20$ г	$10,6 \pm 6,7$
		$N = 10$ г	$10,7 \pm 6,1$
	3.2. Очистка по п. 1.1, выдержка 15 мин при нагреве до 250 °С, охлаждение до 20 °С и выдержка 15 мин под слоем GI	$I = 0,01$ А; $T = 20$ °С; $N = 20$ г	$2,29 \pm 1,05$
	3.3. Подготовка по п. 3.2 и выдержка 48 ч при 20 °С под слоем GI		$1,23 \pm 0,21$

1	2	3	4
3. Лужение (образец после предварительного нанесения олова покрыт эвтектикой GI; контрообразец покрыт эвтектикой GI)	3.4. Подготовка по п. 3.2 и выдержка 48 ч при 100 °С под слоем GI	$I = 0,1 \text{ A};$ $T = 20 \text{ }^\circ\text{C};$ $N = 20 \text{ г}$	$0,505 \pm 0,110$
	3.5. Очистка по п. 1.1, выдержка 15 мин при нагреве до 250 °С, медленное (в течение 1 ч) охлаждение с нагревателем до 20 °С под слоем GI, промывка в свежем GI		$0,383 \pm 0,045$
4. Смачивание (образец и контрообразец покрыты эвтектикой GI)	4.1. Очистка – абразивная бумага, промывка ацетоном, спиртом, обработка флюсом при 20 °С, тщательная промывка спиртом, протирание хлопчатобумажной тканью		$0,595 \pm 0,136$
	4.2. Очистка – абразивная бумага, промывка ацетоном, спиртом, кипящий флюс, тщательная промывка бензином, спиртом, протирание хлопчатобумажной тканью		$0,605 \pm 0,166$
	4.3. Очистка по п. 4.2, выдержка образца в течение 240 ч при 20 °С под индентором при нагрузке $N = 20 \text{ г}$		$0,481 \pm 0,122$
5. Механическая обработка (образец и контрообразец покрыты эвтектикой GI)	5.1. Очистка по п. 4.2, обработка скальпелем под слоем GI	$0,315 \pm 0,016$	

При смачивании жидким металлом ювенильной поверхности образцов средний диапазон значений контактного сопротивления R_k объясняется тем, что при получении очищенной поверхности обработкой абразивами и последующей промывкой растворителями, которые объективно занимают некоторое время, часть твердой поверхности неизбежно окисляется, что сказывается на однородности свойств получаемого ЖМ-покрытия.

Механическая обработка скальпелем твердой поверхности образца контактной детали под слоем жидкого металла показала стабильный лучший результат минимальных значений контактного сопротивления R_k .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка возможности и целесообразности применения промежуточных ЖМ-сред в скользящих электрических контактах проводилась по двум критериям: сохранности жидкого металла на твердых контактных поверхностях при сдвиге зонда с последующей стабильностью ЖМ-покрытия при фрикционном взаимодействии в скользящем контакте; наименьшему диапазону значений контактного сопротивления R_k . На основании этих критериев давалась итоговая оценка пригодности того или иного

метода образования ЖМ-покрытия для обеспечения функциональных свойств промежуточной ЖМ-среды как компонента трибосистемы скользящего ЖМК. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнительный анализ галлийсодержащих ЖМ-покрытий

Метод получения ЖМ-покрытия	Диапазон R_k , 10^{-3} Ом	Оценка сохраняемости при сдвиге зонда	Пригодность для скользящего ЖМК
Гальваническое осаждение	195...973	Хорошая	Плохая
Предварительное лужение	0,343...18,6	Хорошая	Удовлетворительная
Смачивание жидким металлом	0,359...0,771	Удовлетворительная	Удовлетворительная
Механическая обработка под жидким металлом	0,299...0,331	Хорошая	Хорошая

Хорошее с точки зрения адгезии и сохранности при фрикционном взаимодействии качество ЖМ-покрытия, образованного на твердой поверхности гальваническим осаждением галлия и использованием материала-посредника, хорошо взаимодействующего с галлием, полностью нивелировалось высоким и, что самое главное, неустойчивым контактным сопротивлением R_k .

Неплохие с точки зрения низких значений контактного сопротивления R_k результаты смачивания галлием и его эвтектическими сплавами твердой поверхности при статическом взаимодействии давали при относительном сдвиге кратковременный эффект сохраняемости ЖМ-покрытия, которое интенсивно изнашивалось вплоть до потери в ряде режимов трения адгезии с твердой поверхностью и полного разрушения покрытия. При оптимальных для ЖМ-покрытия режимах трения наблюдался и двухкратный рост контактного сопротивления R_k , что недопустимо при эксплуатации скользящих электрических контактов.

Вывод о хорошей пригодности для скользящих электрических контактов ЖМ-покрытий на основе галлия и его эвтектических сплавов, полученных при механической обработке твердой поверхности контакт-деталей под слоем жидкого металла, был в дальнейшем подтвержден при изучении фрикционных характеристик скользящих контактов с промежуточной ЖМ-средой.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в тесном сотрудничестве с коллективом кафедры прикладной физики Тверского государственного технического университета. Отдельную благодарность выражаем профессору, доктору технических наук Измайлову Владимиру Васильевичу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Guo J., Cheng J., Tan H., Zhu SY., Qiao ZH., Yang J., Liu W. Ga-based Liquid Metal: A Novel Current-carrying Lubricant // *Tribology International*. 2019. V. 135. P. 457–462.
2. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Интеллект. 2008. 560 с.

3. Klaudy P. Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten von Flüssigkeitskontakten // *Elektrotechnische Zeitschrift*. 1955. V. 76. № 15. S. 525–532.

4. Klaudy P. Ein neuer Flüssigkeitsrollkontakt und seine mögliche Verwendung im Hochleistungselektromaschinenbau // *Elektrotechnik und Maschinenbau*. 1972. V. 89. № 11. S. 440–445.

5. Митюрёв А.А. Исследование электрической проводимости промежуточной жидкометаллической среды скользящих электрических контактов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 1 (17). С. 5–10.

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., Митюрёв А.А. Трибологические аспекты применения жидкометаллической межконтактной среды в электрических контактах // *Трение и износ*. 1995. Т. 16. № 6. С. 1133–1143.

8. 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.

9. Дегтярь В.Г. Разработка основ теории и синтеза жидкометаллических контактов и контактных устройств. Дисс. ... д-ра техн. наук. М. 1990. 421 с.

10. Гальванотехника: справочник / Ф.Ф. Ажогин [и др.]. М.: Металлургия. 1987. 736 с.

Для цитирования: Митюрёв А.А. Некоторые закономерности применения промежуточных жидкометаллических сред в скользящих электрических контактах // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 1 (17). С. 11–18.

SOME REGULARITIES OF APPLICATION OF INTERMEDIATE LIQUID METALLIC MEDIA IN SLIDING ELECTRIC CONTACTS

A.A. MITYUREV, Cand. Sc.

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

The description is given of the installation design based on the device for microhardness measuring PMT-3 for studying the frictional and electrical characteristics of sliding contacts with an intermediate liquid-metal (LM) medium for electrical machines and apparatuses. The setup makes it possible to evaluate the frictional stability of the LM coating under the relative shear of solid contact parts, to determine the contact electrical resistance of intermediate LM media in the temperature range 20...250 °C. The comparative analysis of the possibility of using LM coatings formed on solid contact parts by various methods for sliding electrical contacts has been carried out. The advantage of an LM coating based on gallium and its eutectic alloys, obtained by mechanical processing of a solid surface of a contact part under a layer of liquid metal, has been proved.

Keywords: sliding electrical contact, friction, wear, liquid metal contact, gallium, eutectic alloy, contact resistance.

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.23.05

МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕОХОДА И ЕГО СИСТЕМ С ГЕОСРЕДОЙ. НЕОБХОДИМОСТЬ ПЕРЕФОРМАТИРОВАНИЯ

В.В. АКСЕНОВ^{1,2}, д-р техн. наук, В.Ю. БЕГЛЯКОВ³, канд. техн. наук,
В.Ю. САДОВЕЦ^{2,4}, канд. техн. наук, Д.А. ПАШКОВ^{2,4}, канд. техн. наук,
Р.С. ОСИПОВ⁵, ведущ. инженер, И.Р. ИЗМАЙЛОВ⁵, ведущ. инженер

¹Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН,
650610, Кемерово, пр. Ленинградский, 10, e-mail: 55vva42@mail.ru

²Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева,
650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28

³Юргинский технологический институт,
Филиал Томского политехнического университета,
652052, Юрга, ул. Ленинградская, 26

⁴Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева,
Филиал в Прокопьевске, 653033, Кемеровская обл., Прокопьевск, ул. Ноградская, 19а

⁵АО «Уральский научно-технологический комплекс»,
622007, Нижний Тагил, Восточное шоссе, 28А

© Аксенов В.В., Бегляков В.Ю., Садовец В.Ю.,
Пашков Д.А., Осипов Р.С., Измайлов И.Р., 2023

Рассмотрена задача по переформатированию существующей модели определения параметров геохода в модель взаимодействия геохода с геосредой с учетом особенностей этой среды. Предложена структура математической модели взаимодействия геохода и его систем с геосредой.

Ключевые слова: горное оборудование, проходческий подземный аппарат, геосреда, геоход, геоходная технология, математическая модель.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-1-19-28

ВВЕДЕНИЕ

В бурно меняющейся мировой экономической обстановке перед Россией возникают глобальные задачи, связанные с разработкой и внедрением новых подходов к постановке и освоению производства новых видов техники и машин. Эти подходы должны быть направлены не только на замещение импортного оборудования, но и формирование иных классов машин и оборудования, которые бы не только составили конкуренцию существующим импортным аналогам по техническим характеристикам, но и превосходили их.

Одними из основных отраслей промышленности, которые больше всего пострадали от санкций, являются добыча полезных ископаемых и строительство подземных сооружений. В первую очередь это связано с прекращением поставок

высокотехнологичного горнопроходческого оборудования ведущих мировых производителей. Доля импортного горнопроходческого оборудования на отечественных предприятиях, ведущих добычу твердых полезных ископаемых, составляет более 60 % [1]. На сегодняшний день в России горнопроходческие машины производятся на Копейском и Ясиноватском машиностроительных заводах. Объем выпускаемого в РФ горнопроходческого оборудования не может удовлетворить спрос конечных потребителей. Кроме того, в России не производят проходческие комплексы [2].

Таким образом, в сложившейся неблагоприятной экономической обстановке Правительством РФ поставлена задача не только наращивать темпы импортозамещения материалов и оборудования, но и искать инновационные подходы к созданию различных типов оборудования. Можно выделить три способа решения указанной задачи:

- 1) совершенствование и модернизацию существующего горнопроходческого оборудования;
- 2) проведение реверс-инжиниринга импортного оборудования;
- 3) разработку машин и оборудования, превосходящих по техническим характеристикам импортные аналоги, на базе современных подходов к формированию (освоению) подземного пространства.

Реализация первых двух направлений позволит сделать технологический рывок в отечественном производстве горнопроходческого оборудования, но оставит нас на позициях «догоняющих» производителей. Третье направление даст возможность осуществить принцип «не догоняя, обгонять», то есть российские производители не только обеспечат страну оборудованием, которое раньше поставляли зарубежные фирмы и организации, но и выйдут на лидирующие позиции по производству горнопроходческой техники, не имеющей аналогов и превосходящей иностранные машины по техническим характеристикам.

В рамках приведенных выше целей и задач коллективом авторов предложен новый технологический уклад формирования (освоения) подземного пространства на базе концепции опережающего развития отечественной строительной геотехнологии и геотехники (рис. 1) [3].

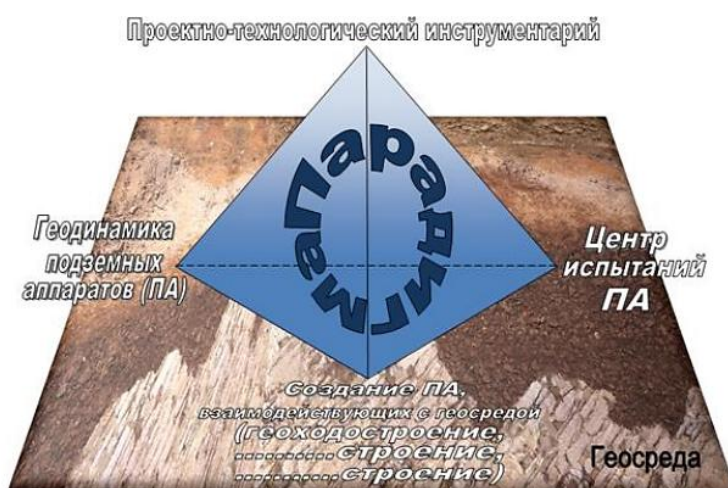


Рис. 1. Разработанная коллективом авторов структура перспективного технологического уклада освоения (формирования) подземного пространства

Одним из основных структурных элементов технологического уклада является создание подземных аппаратов, взаимодействующих с геосредой – приконтурным массивом горных пород, охватывающим проходческий подземный аппарат при его движении. Разработчиками нового подхода был спроектирован и изготовлен пилотный образец нового класса подземных аппаратов (ПА) модели 401 диаметром 3,2 м (рис. 2) [4].



Рис. 2. Опытный образец ПА модели 401 диаметром 3,2 м

ОСОБЕННОСТИ ПА КЛАССА «ГЕОХОД» И ГЕОХОДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Основная особенность ПА класса «геоход» – включение массива горных пород в образование напорных усилий на исполнительном органе машине. Кроме того, во время проведения опытных испытаний ПА класса «геоход» были выявлены преимущества нового класса машин [5–10]:

наличие внешней (законтурной) опорно-двигательной системы, включающей новые функционально-конструктивные элементы, взаимодействующие с геосредой;

использование геосреды (приконтурного массива горных пород) для формирования тягового и напорного усилий, при этом приконтурный массив выступает кинематическим звеном, находится в зацеплении с законтурной опорно-двигательной системой;

возможность горизонтального и вертикального маневрирования;

универсальность по углам наклона проводимой выработки в широком диапазоне;

исключение веса машины из процесса формирования тягового усилия;

создание на исполнительном органе разрушения забоя ПА достаточных напорных усилий без искусственного наращивания веса ПА.

Стоит отметить, что ПА «Геоход» – изделие, которое является горнопроходческим оборудованием нового поколения, которое превосходит по тактико-техническим характеристикам импортные и отечественные аналоги. При движении в геосреде ПА нового класса необходимо преодолевать лобовое сопротивление (сумму сопротивлений геосреды движению элементов ПА, взаимодействующих с геосредой). Для создания силы тяги, которая противоположно направлена лобовому сопротивлению и создается взаимодействием внешнего двигателя ПА с геосредой (рис. 3), ПА класса «геоход» использует приконтурный массив горных пород, что позволяет исключить влияние веса машины на формирование силы тяги. Существующие же типы горнопроходческой техники для увеличения усилий на исполнительном органе требуют наращивания массы горнопроходческого оборудования.

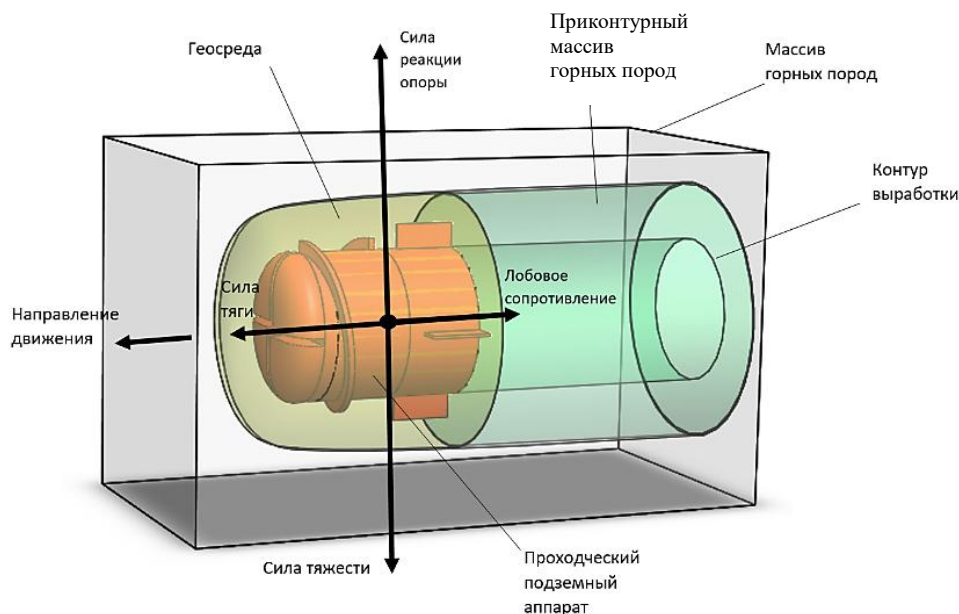


Рис. 3. Силы, действующие на проходческий подземный аппарат при движении

Технологию проведения подземных горных работ с применением ПА класса «геоход» называют геоходной. Эта технология обладает рядом потенциальных преимуществ перед традиционными способами проходки [11–17]:

возможностью строительства подземных сооружений и проведения выработок под различными углами наклона;

возможностью создания новых типов крепей на основе ресурсосберегающих технологий изготовления элементов крепи;

увеличенной производительностью при меньшей мощности и массе оборудования.

Важным преимуществом является также то, что отсутствуют ограничения в использовании проходческого оборудования по углам строительства подземных выработок.

«Прародителем» ПА класса «геоход» был винтоповоротный проходческий агрегат (ВПА) «ЭЛАНГ» (название агрегата – аббревиатура, составленная из первых букв фамилий разработчиков (А.Ф. Эллер, В.В. Аксенов, В.Д. Нагорный, В.Ф. Горбунов)). При создании, проектировании, а главное, при разработке методики определения параметров ВПА были заложены традиционные подходы конструирования горнопроходческой техники, которые применяются и сейчас.

Существующее научно-методическое обеспечение по разработке и созданию горных машин не соответствует особенностям работы нового класса ПА («геоход») и требованиям к этой работе. Для большинства систем и элементов нового класса ПА («геоход») отсутствуют методики расчета и обоснованного выбора рациональных параметров. Остро назрел вопрос в формировании нового подхода к проектированию ПА. В основе этого подхода должно лежать решение, основанное на принципе перемещения ПА при образовании полости в подземном пространстве. Проходка подземных выработок авторами рассматривается как процесс движения твердого тела в твердой среде (геосреде). При разработке моделей определения параметров ПА класса «геоход» и его систем необходимо учитывать силы преодоления сопротивления геосреды движению ПА.

Во время создания экспериментальных и опытных образцов нового класса ПА («геоход») [18–24], а именно на этапе проектирования, разработчики столкнулись с тем, что отсутствует научно-методическое обеспечение определения параметров основных элементов и систем ПА, взаимодействующих с геосредой при его движении. Кроме того, существующую методику нахождения параметров ПА класса «геоход» не представляется возможным адаптировать для решения новых задач, возникающих из-за появления новых устройств и систем геоходов.

Системы геохода, взаимодействующие с геосредой, описаны в таблице. Расположение этих систем в механизме показано на рис. 4.

Системы геохода, взаимодействующие с геосредой

Название системы	Назначение
Геоход	Формирование подземного пространства, строительство подземных выработок
Исполнительный орган главного забоя (ИО ГЗ)	Преодоление фронтального сопротивления геосреды и формирования в ней пространства для движения корпусов тягового и опорного модуля ПА
Корпус тягового модуля	Безопасное движение ПА при проведении подземной выработки; размещение внутри оборудования, а на наружной поверхности – внешнего движителя и его ИО
Корпус опорного модуля	Безопасное движение ПА при проведении подземной выработки; размещение внутри оборудования, а на наружной поверхности – элементов противовращения (крыльев) и их ИО
Внешний движитель	Создание силы тяги и напорного усилия на всех ИО ПА
Исполнительный орган внешнего движителя (ИО ВД)	Преодоление сопротивления геосреды и формирования в ней пространства (винтового канала) для движения внешнего движителя
Элементы противовращения	Восприятие реактивного момента при движении ПА
Исполнительные органы элементов противовращения (ИО ЭП)	Преодоление сопротивления геосреды и формирования в ней пространства (продольных каналов) для движения элементов противовращения

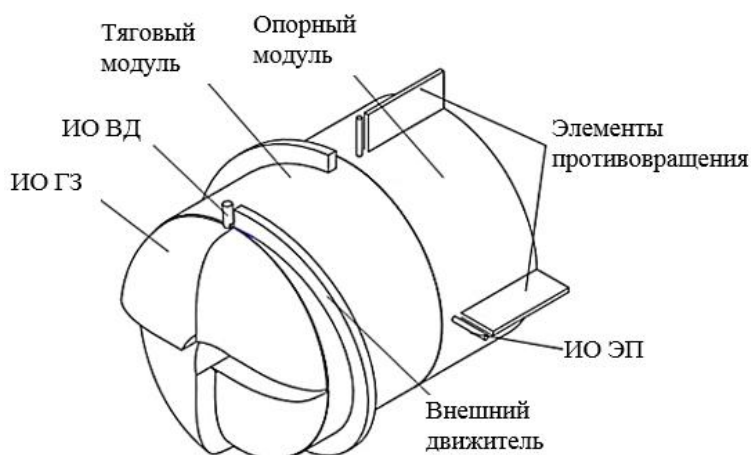


Рис. 4. Общий вид проходческого ПА класса «геоход»

Отсутствие научно-методического обеспечения является сдерживающим фактором на пути создания нового класса ПА!

С учетом предложенного подхода к проведению подземных выработок и новых принципов создания ПА был разработан и изготовлен демонстрационный образец ПА класса «геоход» диаметром 0,64 м. Он обладает принципиальным отличием конструкции от опытного образца ПА модели 401 диаметром 3,2 м.

Стендовые испытания ПА класса «геоход» диаметром 0,64 м в сыпучей геосреде выявили недостатки применения при разработке модели определения параметров геохода, которая не учитывает возникающие при движении ПА геодинамические явления. Движение демонстрационного образца ПА «Геоход» в указанной геосреде выявило наличие вязкого трения (перемещения слоев этой среды) между системами ПА и геосредой (рис. 5), что проявилось как налипание геосреды на элементы демонстрационного образца ПА класса «геоход».



Рис. 5. Положение демонстрационного образца геохода после предварительных испытаний

Чтобы разработать новые образцы, нужно решить задачу по переформатированию в соответствии с современными условиями, правилами модели определения параметров геохода (трансформации этой модели в модель взаимодействия геохода и его систем с геосредой с учетом обозначенных особенностей, целей и задач по созданию другого класса горнопроходческой техники). В этом русле выполнены первые исследования и получены результаты [25, 26], которые в целом можно расценивать как получение «разведанных» для принятия решений по выбору направлений дальнейших исследований и созданию экспериментальных образцов ПА.

Применительно к разработке нового класса ПА приоритетным является создание или совершенствование общих компоновок ПА класса «геоход», корпусов, трансмиссий, внешних движителей, элементов противовращения, исполнительных органов разрушения забоя, законтурных исполнительных органов, элементов управления ПА по трассе проводимой выработки, погрузочных модулей, транспортных систем, энергосиловых установок, стартовых устройств, крепевозводящих модулей. Анализ существующей математической модели определения силовых параметров ПА класса «геоход», а также новых исследований геоходной тематики [10–26] позволил нам сформулировать требования к переформатированной модели взаимодействия геохода и его систем с геосредой.

ТРЕБОВАНИЯ К МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕОХОДА И ЕГО СИСТЕМ С ГЕОСРЕДОЙ

Переформатированная математическая модель взаимодействия геолода и его систем с геосредой должна учитывать связь модели систем и элементов ПА класса «геолод» между собой и геосредой; обеспечивать определение геометрических, силовых и энергетических параметров ПА указанного класса и его систем, выбор рациональной внешней формы ПА; учитывать геодинатические явления, возникающее при движении твердого тела в твердой среде, а также различные режимы работы и направления движения при поиске геометрических, силовых и энергетических параметров ПА класса «геолод»; давать возможность включения моделей взаимодействия с геосредой новых систем и элементов ПА класса «геолод». На основании этих требований была разработана структура взаимодействия ПА класса «геолод» и его систем с геосредой (рис. 6). Эта структура стала базой научно-методического обеспечения создания нового класса горнопроходческой техники, а именно ПА класса «геолод».

Необходимо, согласно разработанной модели, трансформировать имеющиеся математические модели определения параметров систем геолода, а также создать новые модели взаимодействия систем геолода с геосредой. Первоочередными для переформатирования и разработки выступают модели взаимодействия ИО ГЗ с геосредой; корпуса тяговой секции с геосредой; ВД тяговой секции с геосредой; ИО ВД тяговой секции с геосредой; корпуса стабилизирующей секции с геосредой; корпуса ИО ЭП секции с геосредой.

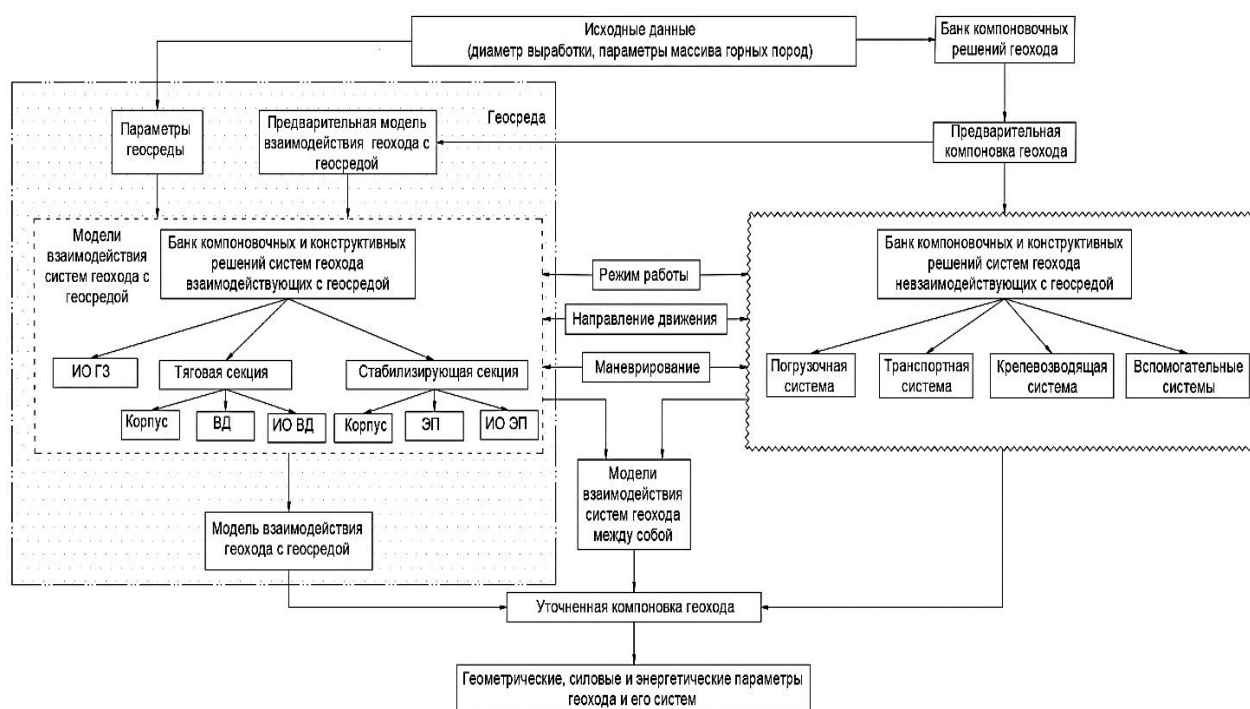


Рис. 6. Структура математической модели взаимодействия геолода и его систем с геосредой

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлено три пути выхода из кризисной ситуации, сложившейся в отечественном производстве горнопроходческой техники. Перспективным является направление, которое позволит реализовать принцип «не догоняя, обгонять».

Основным сдерживающим фактором создания и разработки нового класса горнопроходческой техники, в частности ПА класса «геоход», как мы не раз говорили выше, выступает отсутствие научно-методического обеспечения определения параметров систем и элементов ПА, взаимодействующих с геосредой при его движении. Предложенная структура математической модели взаимодействия геохода и его систем с геосредой позволяет учитывать не только сопротивление геосреды при движении ПА класса «геоход», но и взаимодействие систем геохода между собой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плакиткина Л.С., Плакиткин Ю.А., Дьяченко К.И. Оценка производственного потенциала отечественных машиностроительных предприятий для реализации программы импортозамещения в угольной отрасли // *Уголь*. 2021. № 1 (1138). С. 34–42.
2. Аксенов В.В., Магазов С.В., Хорешок А.А., Бегляков В.Ю., Садовец В.Ю., Пашков Д.А. Геодинамика подземных аппаратов. Формула специальности, области исследований // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2020. № 2 (138). С. 31–41.
3. Аксенов В.В., Хорешок А.А., Бегляков В.Ю. Концепция создания перспективного технологического уклада формирования (освоения) подземного пространства на базе опережающего развития новых подходов в строительной геотехнологии и геотехнике. Часть 2 // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2018. № 5 (129). С. 43–52.
4. Ефременков А.Б. Разработка научных основ создания систем геохода. Дисс. ... д-ра техн. наук. Кемерово. 2016. 314 с.
5. Аксенов В.В., Бегляков В.Ю., Дубинкин Д.М. Обоснование необходимости создания нового научного направления – геодинамика подземных аппаратов // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021. Т. 13. № 4 (50). С. 637–643.
6. Блащук М.Ю. Обоснование параметров трансмиссии геохода с гидроприводом. Дисс. ... канд. техн. наук. Юрга. 2012. 155 с.
7. Блащук М.Ю., Чернухин Р.В. Основные требования к насосной станции геохода // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки»*. 2013. № 5-6. С. 30–32.
8. Blashchuk M.Yu., Kasantsev A.A., Chernukhin R.V. Capacity calculation of hydraulic motors in geokhod systems for justification of energy-power block parameters // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. V. 682. P. 418–425.
9. Дронов А.А. Обоснование параметров узла сопряжения секций геохода. Дисс. ... канд. техн. наук. Кемерово. 2020. 169 с.
10. Blaschuk M.Y., Dronov A.A., Ganovichev S.S. Calculation of Free Interior Dimensions in Geokhod Transmission with Hydraulic Cylinders // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2016. V. 127. № 1. P. 012033.
11. Дронов А.А., Блащук М.Ю., Тимофеев В.Ю. Формирование требований к узлу сопряжения секций геохода // *Горное оборудование и электромеханика*. 2016. № 8 (126). С. 39–42.
12. Blashchuk M.Y., Dronov A.A., Ganovichev S.S. Calculation of geometrical parameters of geokhod transmission with hydraulic cylinders // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Innovative Technologies in Engineering*. IOP Publishing. 2016. V. 142. P. 12128.
13. Chernukhin R.V., Dronov A.A., Blashchuk M.Y. The Application of the Analytic Hierarchy Process When Choosing Layout Schemes for a Geokhod Pumping Station // *IOP*

Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. 2015. V. 91. № 1. P. 012086.

14. Чернухин Р.В., Блащук М.Ю., Буялич Г.Д., Богодаев А.А. Определение тепловой мощности, отводимой гидробаками насосной станции геохода // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2015. № 6-2. С. 209–213.

15. Chernukhin R.V., Timofeev V.Yu., Grigoryeva E.G. Effect of Incorporated Pumping Station Weight on the Rotating Torque of Geokhod Transmission // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. 2016. V. 127. № 1. P. 012035.*

16. Чернухин Р.В. Обоснование параметров насосной станции энергосиловой установки геохода. Дисс. ... канд. техн. наук. Кемерово. 2014. 129 с.

17. Хорешок А.А., Ананьев К.А., Ермаков А.Н., Шахманов В.Н. Обоснование схемы установки и направления вращения барабанов на исполнительном органе геохода // *Горное оборудование и электромеханика*. 2019. № 4 (144). С. 15–20.

18. Walter A.V., Borovikov I.F., Chernukhin R.V., Nozirzoda S.S. Research on geometric errors of intermediate unit shell of a geokhod // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. 2016. V. 127. № 1. P. 012017.*

19. Walter A.V., Borovikov I.F., Savin M.F. Research on Geometrical Errors of Geokhod Prototype Shell Based on Coordinate Control Data // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. 2016. V. 142. № 1. P. 012129.*

20. Вальтер А.В. Факторы, обуславливающие погрешности поверхностей вращения крупногабаритных корпусов геохода // *Горное оборудование и электромеханика*. 2016. № 8 (126). С. 19–25.

21. Вальтер А.В., Чернухин Р.В., Капустин А.Н. Отклонения формы оболочки стабилизирующей секции геохода // *Технологии и материалы*. 2016. № 1. С. 4–7.

22. Вальтер А.В., Нозирзода Ш.С. Аналитическая модель формирования отклонений биения, возникающих при сборке корпусов геохода // *Технологии и материалы*. 2016. № 4. С. 4–8.

23. Вальтер А.В., Лагунов С.Е. Определение припуска на поверхности вращения сборных корпусных изделий геохода // *Актуальные проблемы в машиностроении*. 2015. № 2. С. 152–157.

24. Чернухин Р.В., Блащук М.Ю., Буялич Г.Д., Богодаев А.А. Определение тепловой мощности, отводимой гидробаками насосной станции геохода // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2015. № 6-2. С. 209–213.

25. Аксенов В.В., Бегляков В.Ю., Коперчук А.В., Блащук М.Ю., Садовец В.Ю., Пашков Д.А. Создание проходческих подземных аппаратов, взаимодействующих с геосредой. Области исследований // *Горное оборудование и электромеханика*. 2020. № 2 (148). С. 3–12.

26. Аксенов В.В., Хорешок А.А., Бегляков В.Ю., Пашков Д.А. Геодинамика проходческих подземных аппаратов. Геосреда, форма и поверхности // *Горное оборудование и электромеханика*. 2021. № 3 (155). С. 39–47.

Для цитирования: Аксенов В.В., Бегляков В.Ю., Садовец В.Ю., Пашков Д.А., Осипов Р.С., Измайлов И.Р. Модель взаимодействия геохода и его систем с геосредой. Необходимость реформатирования // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 1 (17). С. 19–28.

A MODEL OF INTERACTION OF A GEOKHOD AND ITS SYSTEMS WITH THE GEO-ENVIRONMENT. THE NEED FOR REFORMATTING

V.V. AKSENOV^{1,2}, Dr. Sc., V.Yu. BEGLYAKOV³, Cand. Sc,
V.Yu. SADOVETS^{2,4}, Cand. Sc, D.A. PASHKOV^{2,4}, Cand. Sc,
R.S. OSIPOV⁵, Lead Engineer, I.R. IZMAILOV⁵, Lead Engineer

¹ Institute of Coal FITZ UUH SB RAS,
10, Leningrad ave., Kemerovo, 650610, Russian Federation, e-mail: 55vva42@mail.ru

² Kuzbass State Technical University named T.F. Gorbachev,
28, Vesennaya str., Kemerovo, 650000, Russian Federation

³ Yurginsky Institute of Technology Branch of Tomsk Polytechnic University,
26, Leningradskaya str., Yurga, 652052, Russian Federation

⁴ Kuzbass State Technical University named T.F. Gorbachev, Branch in Prokopyevsk,
19a, Nogradskaya str., Kemerovo region, Prokopyevsk, 653033, Russian Federation

⁵ SC «Ural Scientific and Technological Complex»,
28A, Vostochny hwy, Nizhny Tagil, 62007, Russian Federation

The problem of reformatting the existing model for determining the parameters of a geo-pass into a model of interaction between a geo-pass and a geo-medium, taking into account the designated features, has become acute. The structure of the mathematical model of interaction of a geokhod and its systems with the geo-environment is proposed.

Keywords: mining equipment, tunneling underground apparatus, geomedia, geokhod, geokhod technology, mathematical model.

Поступила в редакцию/received: 21.10.2022; после рецензирования/revised: 11.11.2022;
принята/accepted: 18.11.2022

УДК 622.285

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ДИСПЕРГАТОРА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ РАБОЧИХ ЖИДКОСТЕЙ ГОРНЫХ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ КРЕПЕЙ

А.Л. ЯБЛОНЕВ¹, д-р техн. наук, П.Б. ПАШКО², инженер

¹Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: alvovich@mail.ru

²ООО «Пик Майнинг»,
127015, Москва, ул. Большая Новодмитровская, 36, стр. 12

© Яблонев А.Л., Пашко П.Б., 2023

Эффективность работы горных гидромеханизированных крепей во многом определяется качеством рабочих жидкостей – эмульсий. Широкому использованию при их приготовлении растворимого в воде импортного эмульсола в настоящее время препятствует стоимость последнего, трудности логистического плана, а также то, что весьма большое количество горно-шахтных предприятий имеет старые, изношенные сильно горные крепи с повышенным расходом эмульсии. Для решения данной

Вестник Тверского государственного технического университета.

Серия «Технические науки». № 1 (17), 2023

проблемы был разработан диспергатор с модуляцией потока, принцип действия которого основан на кавитации для интенсивного перемешивания воды и эмульсола. Был построен стенд с опытным диспергатором и приготовлена эмульсия, состоящая по объему из 98 % воды и 2 % отечественного эмульсола. Анализ полученной рабочей жидкости, проведенный с применением электронного микроскопа, показал, что данная эмульсия обладает на 30...50 % более высокой дисперсностью, чем традиционные, приготовленные с помощью известных гидромеханических диспергаторов.

Ключевые слова: горная механизированная крепь, диспергатор, рабочая жидкость, модуляция потока, гидродинамическая кавитация, акустическая кавитация, дисперсность.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-1-28-40

ВВЕДЕНИЕ

Добыча угля подземным способом в России в 2020 г. составила более 100 млн т. В начале 2021 г. работали 58 угольных шахт, 42 из них – по технологии «шахта-лава». Средняя нагрузка на лаву сегодня составляет около 5 000 т/сут.

В подземной добыче угля используются очистные механизированные комплексы, которые включают в себя очистной комбайн, скребковый конвейер и механизированные крепи, которые поддерживают кровлю, препятствуют ее обрушению и служат для перемещения конвейера [1, 2]. Механизированная крепь – уникальная гидравлическая система; в состав одной секции крепи входит в среднем от 6 до 8 гидроцилиндров, а в состав комплекса в среднем – от 250 до 300 таких секций. Вертикальные цилиндры – гидростойки – препятствуют обрушению кровли. Горизонтальные цилиндры – гидродомкраты – служат для перемещения конвейера и собственно крепи. Длина комплекса может достигать 400 и более метров, состоять из нескольких тысяч элементов, а давление жидкости в гидростойках доходит до 60 МПа и более [3, 4].

Рабочие жидкости (РЖ) для крепей – это эмульсии; они в значительной степени определяют надежность и ресурс элементов гидросистемы механизированного комплекса. Питание рабочей жидкостью производится от насосов. Эти насосы находятся на насосной станции в составе энергопоезда. К эмульсиям предъявляются специфические строгие требования (однородность, высокая дисперсность, сопротивление к коагуляции). Изначально для работы механизированных крепей применялось минеральное масло, что было дорого и небезопасно. Далее стали применяться эмульсии, приготовлявшиеся при помощи мешалок и состоящие на 95...98 % из воды и на 2...5 % из эмульсолов – специальных добавок, обеспечивающих необходимые свойства рабочим жидкостям. Качество таких эмульсий было низким. Позже для приготовления эмульсий начали применять диспергаторы, позволяющие получать высокодисперсную эмульсию, за счет чего значительно увеличился ресурс элементов механизированной крепи. В диспергаторе с помощью ультразвука и кавитации смешивают эмульсол с водой, а также разбивают эмульсол на более мелкие фракции, то есть делают его более высокодисперсным. После появления эмульсолов третьего поколения (растворимых в воде импортных эмульсолов) диспергаторы стали реже использовать для приготовления эмульсии. Однако в условиях текущей экономической и политической ситуации использование растворимых в воде импортных эмульсолов невыгодно: они почти в пять раз дороже нерастворимых российских. Проблемы с применением зарубежных эмульсолов возникли в 2014 г. и с тех пор только усугубляются, возрастает риск в логистическом и санкционном планах. Кроме того, есть предприятия, которые используют изношенные горные крепи с повышенным расходом: у этих организаций нет средств покупать

дорогой эмульсол. Поэтому для производства и восстановления рабочей жидкости актуальным становится применение диспергатора как ключевого оборудования комплекса.

Цель данной работы – обоснование параметров диспергатора с модуляцией потока для получения агрегативно устойчивых высокодисперсных рабочих жидкостей механизированных крепей и повышения их работоспособности. Идея работы – получение высокодисперсных рабочих жидкостей механизированных крепей за счет использования рационального режима кавитационного воздействия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В начале работы подобрали диспергатор, который можно было бы взять за основу. Сравнивали концепции аппаратов. В таблице приведены характеристики пяти распространенных аппарат-диспергаторов.

Сравнительная характеристика аппаратов-диспергаторов

Параметры	Аппараты				
	Ультразвуковая установка с магнито-стрикционной колонкой	Ультразвуковая установка с гидродинамическим вихревым излучателем (УГИ-ВМ)	Ультразвуковой гидродинамический смеситель (УГС-7У)	Ультразвуковой гидродинамический эмульгатор (УГДЭ-1)	Роторный диспергатор с модуляцией потока (ДМП)
Производительность, м ³ /ч (м ³ /с)	2 (5,6·10 ⁻⁴)	15 (4,17·10 ⁻³)	7 (1,9·10 ⁻³)	30 (8,35·10 ⁻³)	10 (2,8·10 ⁻³)
Потребляемая мощность, кВт	20	5,5	6	18,5	4
Объем гидравлического тракта установки, м ³	2,5	5	1,5	2	0,25
Масса, кг	900	1 400	600	1 000	120
Среднеарифметический диаметр частицы эмульсии, мкм	5	4	3	4	2
Удельный расход энергии, кВт·ч/м ³	10	0,37	0,86	0,62	0,4
Удельная материалоемкость, кг/(м ³ /ч)	445	93,3	85,7	33,3	12
Удельная производительность, (м ³ /ч)/м ³	0,8	3	4,7	15	40
Удельная потребляемая мощность, кВт/м ³	8	1,1	4	9,25	16

Анализ показал, что диспергатор с модуляцией потока (ДМП) в сравнении с другими известными видами диспергаторов является наиболее перспективным:

превосходит аналоги по таким параметрам, как дисперсность, масса, потребляемая мощность. У него лучшие показатели по удельной производительности и удельной материалоемкости, при этом наименьший объем гидравлического тракта, что свидетельствует о наименьших габаритных размерах. По параметрам ДМП был выбран для дальнейшей работы как наиболее перспективный диспергатор для угольной промышленности. Он был взят за основу для последующего улучшения характеристик (с этой целью были внедрены контроль газосодержания, давления и объемного расхода, лабиринтное уплотнение).

На рис. 1а представлен разработанный и созданный диспергатор с модуляцией потока. Роторный аппарат типа ДМП содержит корпус 1, входной и выходной патрубки аппарата 2 и 3 с регулировочными вентилями 4 и 5, ротор 6 с отверстиями в боковой стенке 7, который установлен на валу 8. Коаксиально ротору 6 установлен статор 9 с отверстиями 10 в боковой стенке и дополнительными каналами 11, коллектор 12 с вентилем 13, дополнительный входной патрубком 14 с диффузором 15 и вентилем 16.

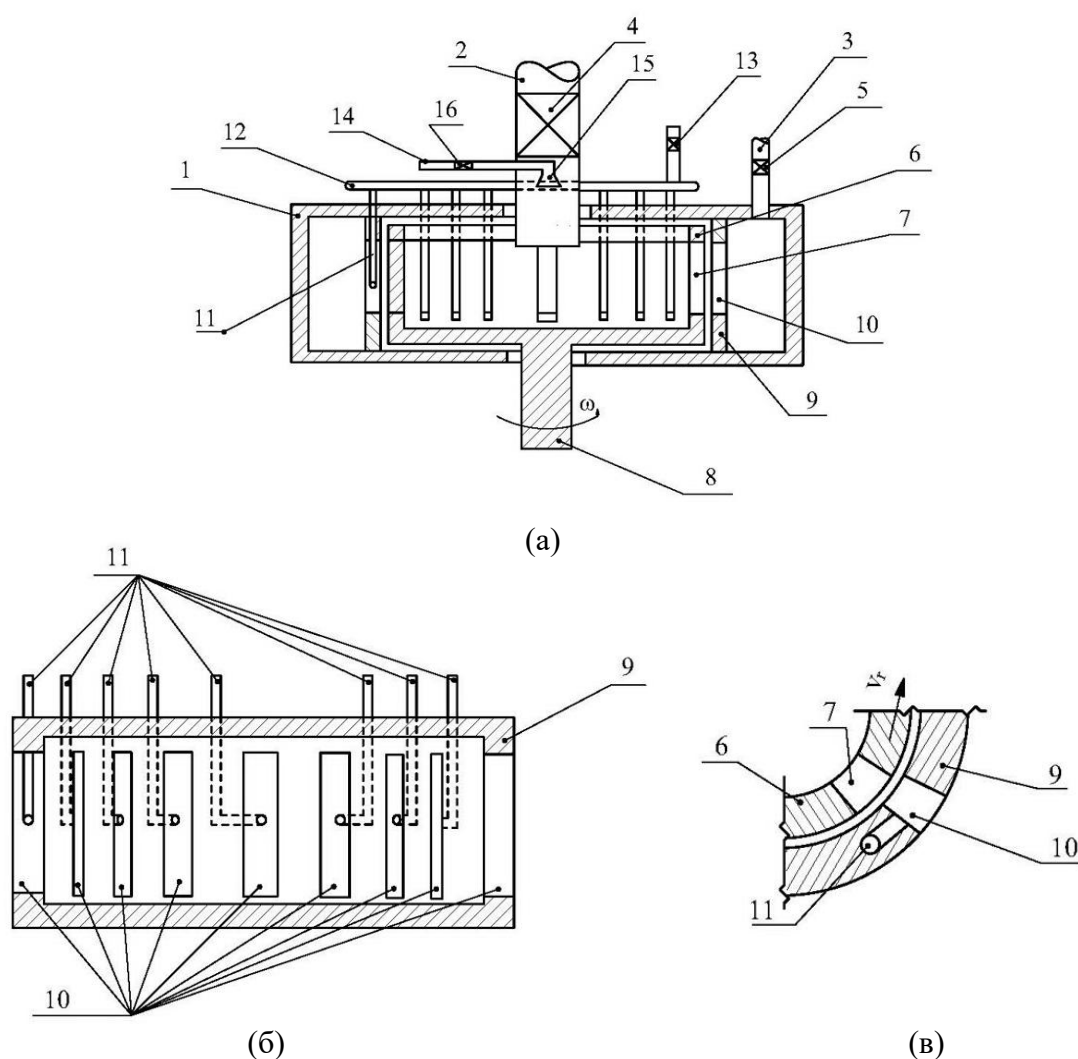


Рис. 1. Роторный аппарат типа ДМП для приготовления рабочей жидкости: диспергатор с модуляцией потока (а); статор с дополнительными каналами для подачи или отсоса воздуха (б); модулятор (в)

Принцип действия ДМП заключается в периодическом совмещении отверстий ротора и статора для получения и поддержания процесса кавитации, что используется

для смешивания и позволяет получать высокодисперсную эмульсию, то есть эмульсию с более мелким диаметром частиц. При движении жидкости из отверстий ротора в патрубки статора наблюдается периодическое сужение площади проходного сечения, возникают переменные импульсы давления, что, в свою очередь, возбуждает импульсную акустическую и импульсную гидродинамическую кавитации [5].

Новизна предлагаемого модернизированного диспергатора заключается в управлении процессом кавитации. Критерий кавитации зависит от объемного расхода, давления жидкости, содержания свободного газа. Объемный расход регулируется вентилем 4, выход эмульсии – вентилем 5, за счет чего создается необходимое давление внутри диспергатора. Регулировка содержания воздуха в рабочей жидкости в диспергаторах подобного типа ранее не проводилась. Для реализации этого процесса воздух подается через патрубок 14 и отбирается через патрубок 12. Регулирование содержания воздуха производится вентилями 13 и 16. Для поддержания стабильного процесса кавитации нужно оптимальное содержание воздуха. Если его количество меньше или больше оптимального, кавитация будет меньшей. Регулируя перечисленные параметры, достигают оптимальных параметров диспергирования и получают высокодисперсные эмульсии.

На рис. 1б изображен статор с дополнительными каналами для подачи или отсоса воздуха, на рис. 1в – модулятор, образованный патрубками подвижного ротора и неподвижного статора (показано положение дополнительных патрубков для подачи или отсоса газа).

Кавитация делает процесс эмульгирования более интенсивным и позволяет получать тонкие эмульсии. При расчете ДМП [6] применялся гидродинамический метод [7], определялся оптимальный обобщенный критерий кавитации χ , в котором учитывались импульсная гидродинамическая и импульсная акустическая кавитации:

$$\chi^{-1} = \chi_r^{-1} + \chi_a^{-1},$$

где χ_r – критерий гидродинамической кавитации; χ_a – критерий акустической кавитации.

Гидродинамическая кавитация возникает при обтекании тела жидкостью или при движении тела в жидкости по сужающимся участкам трубы [8]. Переменные импульсы давления возбуждают импульсную акустическую кавитацию [9].

Различают три вида акустической кавитации: простую (возникает при прохождении через жидкость гармонических волн); импульсную с заполненным импульсом (импульс содержит гармонические волны, образуется волновой пакет); импульсную с незаполненным импульсом (имеют место единичные импульсы с определенным периодом следования, скважностью и длительностью).

Преимущества акустической импульсной кавитации с незаполненным импульсом: нет твердой излучающей поверхности; вся энергия импульса переходит в жидкость без отражения и потерь. Вследствие этих преимуществ для повышения эффективности диспергирования жидкости следует применять именно этот вид кавитации, но улучшенный, то есть с отрицательным импульсом давления, так как при таком импульсе воздушный пузырь расширяется, а изменяться при расширении он может во много раз больше, чем при сжатии (при сжатии он изменяется максимально только на один диаметр) [10]. Отрицательный импульс давления, возбуждающий кавитацию, эффективнее использует энергию для ее передачи в кавитирующую жидкость.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вестник Тверского государственного технического университета.

Серия «Технические науки». № 1 (17), 2023

Была разработана ячеечная математическая модель равномерно распределенных пузырей свободного газа, синхронно колеблющихся, как ансамбль точечных источников звука типа «монополь». Для нее характерно следующее: все пузыри распределены по объему жидкости, имеют одинаковый объем (предполагается, что большие пузыри всплывают, а малые растворяются). Поэтому распределение пузырей можно считать близким к монодисперсному. При этом в модели рассматривается не вся жидкость, а ячейка. Объем ячейки равен сумме объемов жидкости и пузыря. Вся жидкость с пузырями разбита на ячейки. Начальный объем ячейки равен отношению объема жидкости к числу N пузырей. Причем плотность равномерно распределенных в жидкости пузырей – величина, обратная начальному объему ячейки.

Объемное содержание свободного газа

$$\alpha = \frac{V_{п}}{V_{ж} + V_{п}} = \frac{\frac{4}{3}\pi R^3}{V_{ж} + \frac{4}{3}\pi R^3},$$

где $V_{п}$ – объем газового пузыря; $V_{ж}$ – объем жидкости; R – радиус газового пузыря.

Объемное содержание свободного газа для пузыря, совершающего радиально-сферические колебания:

$$\alpha(t) = \frac{\frac{4}{3}\pi R(t)^3}{V_{ж} + \frac{4}{3}\pi R(t)^3},$$

где t – время радиально-сферических колебаний пузыря.

Если начальное объемное содержание свободного газа

$$\alpha_0 = \frac{\frac{4}{3}\pi R_0^3}{V_{ж} + \frac{4}{3}\pi R_0^3},$$

где R_0 – средний начальный радиус пузыря,

то

$$\alpha_0 V_{ж} + \frac{4}{3}\pi R_0^3 \alpha_0 = \frac{4}{3}\pi R_0^3,$$

откуда

$$V_{ж} = \frac{\frac{4}{3}\pi R_0^3 (1 - \alpha_0)}{\alpha_0}.$$

Тогда

$$\alpha(t) = \frac{\frac{4}{3}\pi R(t)^3 \alpha_0}{\frac{4}{3}\pi R_0^3 (1 - \alpha_0) + \frac{4}{3}\pi R(t)^3}.$$

Обозначив относительный радиус свободного пузыря как

$$R^* = \frac{R(t)}{R_0},$$

получим

$$\alpha(t) = \frac{\alpha_0 R^{*3}(t)}{1 - \alpha_0 + \alpha_0 R^{*3}(t)},$$

или

$$\alpha(t) = \alpha_0 R^{*3}(t) [1 - \alpha_0 (1 - R^{*3}(t))]^{-1}.$$

Новизна предлагаемой модели содержания свободного газа для пузыря: в изданных ранее известных работах указывалось, что пузыри в жидкости совершают радиально-сферические колебания в поле гармонических волн, данное же исследование посвящено динамике радиально-сферических колебаний пузыря как ячейки газожидкостной смеси в режиме импульсных гидродинамической и акустической кавитаций [11, 12], благодаря чему можно вводить большую плотность энергии в обрабатываемую среду до явления суперкавитации (каждый импульс излучается в жидкость, а не в газожидкостную среду). Поскольку переменное содержание свободного газа в газожидкостной среде зависит от радиуса пузырей компактной области точечных источников звука, получаем математическую модель концентрации свободного газа, определяющего процесс эмульгирования.

Для исследования процесса получения эмульсии и проверки теоретических расчетов был создан экспериментальный стенд, состоящий из семи блоков (рис. 2, 3).

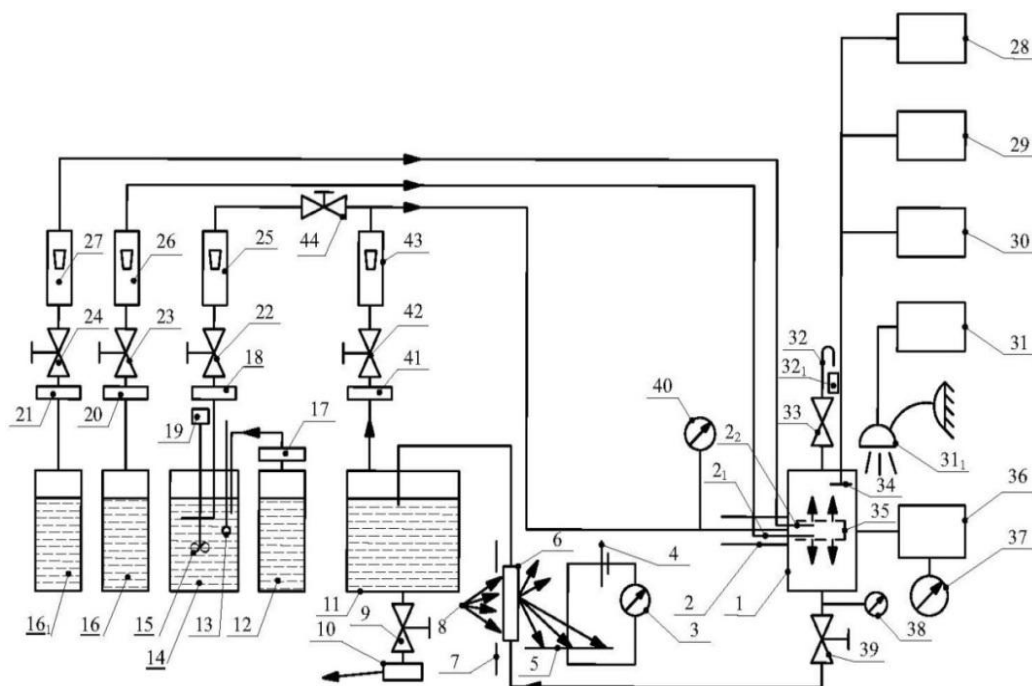


Рис. 2. Блок-схема экспериментального стенда

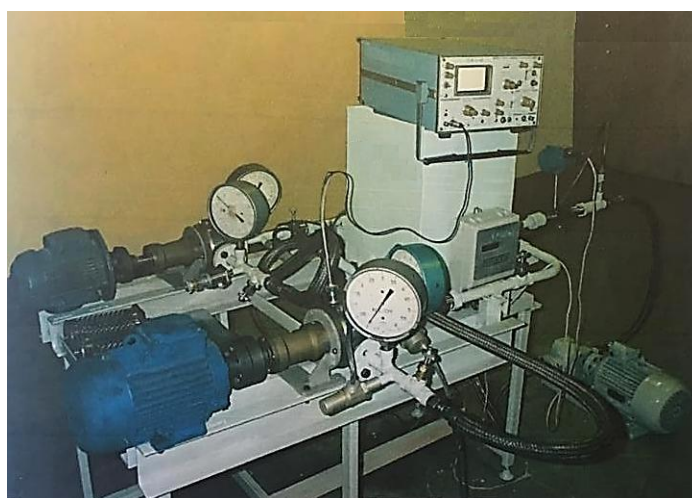


Рис. 3. Общий вид экспериментального стенда

Представленный стенд состоит из следующих элементов:

I. Блок гидромеханического диспергатора: 1 – ДМП с входными патрубками дисперсной сплошной среды 2; патрубки 2_1 и 2_2 возможных двух компонентов дисперсной фазы [13], которые подают их в центральный закрытый с одной стороны стакан 35 с радиальными отверстиями в его боковой стенке; манометры на выходе 38 и входе 40 ДМП; вентили 39 и 33 на выходе ДМП; патрубок 32 для отбора пробы полученной продукции; мерная емкость 32_1 для отбора пробы; электропривод 36 ваттметра 37 для определения мощности привода.

II. Блок емкостей с подачей компонентов: емкость 11 для полученной продукции; выходной вентиль 9; насос 10; емкости для обрабатываемых компонентов РЖ 12, 13, 15, 16; мешалка 14 с приводом 19; насосы для перекачивания 17 и подачи компонентов в ДМП 18, 20, 21; регулирующие вентили 22...24; расходомеры 25...27.

III. Блок линии рециркуляции: насос 41; вентили 42 и 44; расходомер 43.

IV. Блок нефелометра: миллиамперметр 3; источник постоянного тока 4; фотоэлемент 5; кювета 6; диафрагма оптическая 7; источник света 8.

V. Блок акустических измерений: приемник переменного давления 34; импульсные осциллографы марки С1-18 28 и С1-54 29; милливольтметр переменного тока 30.

VI. Блок тахометра 31 с импульсной лампой 31₁.

VII. Блок измерения температуры в емкости 13 с мешалкой 14.

Основной особенностью блока I является подача компонентов дисперсной фазы в центральный, вращающийся вместе с ротором стакан, закрытый снизу [14, 15].

Конструкция ДМП была усовершенствована за счет использования лабиринтных уплотнений на боковых рабочих поверхностях ротора и статора, необходимых для увеличения гидравлического сопротивления транзитному течению через зазор между ротором и статором и скорости изменения плотности вводимой мощности импульса давления, что повышает качество рабочей жидкости. Эта конструкция представляет собой совокупность канавок на рабочих поверхностях ротора и статора, его применение позволяет увеличить дисперсность эмульсии [16, 17].

Экспериментальные работы по использованию ДМП были связаны с получением эмульсии, состоящей из 98 % воды и 2 % эмульсола ЭКС-А ВВК.

На фотографиях, сделанных при увеличении в 630 раз с помощью электронного микроскопа МБИ-6 (рис. 4), представлена рабочая жидкость, полученная на стенде, при различных значениях критерия кавитации. Из них видно, что наиболее высокая дисперсность, то есть самые маленькие капли эмульсии, получаются при значении критерия кавитации 0,2. Можно было бы сделать вывод о том, что чем меньше значение критерия кавитации, тем более высокодисперсной получается жидкость, однако при значительном уменьшении критерия кавитации может получиться не кавитирующая жидкость, а пена (так называемый эффект суперкавитации). Расчеты и эксперименты показали, что оптимальное значение обобщенного критерия кавитации составляет 0,2.

На графике (рис. 5) представлена зависимость неоднородности эмульсии от обратной величины обобщенного критерия кавитации при различных величинах зазора между ротором и статором. Графики построены по результатам анализа микрофотографий. Из кривых рисунка следует, что при небольших величинах зазора неоднородность эмульсии прямо пропорциональна обратной величине критерия кавитации. С увеличением зазора при меньших значениях обратной величины критерия кавитации наблюдается зависимость типа кривой второго порядка.

Критерий неоднородности рассчитывался по формуле

$$K = \frac{\sqrt{(d_i - d_{ap})^2 \Delta N_i}}{N},$$

где d_i – средний диаметр частиц в i -м интервале; d_{ap} – среднеарифметический диаметр частиц; ΔN_i – число частиц, диаметр которых находится в интервале диаметров; N – общее число наблюдаемых частиц.

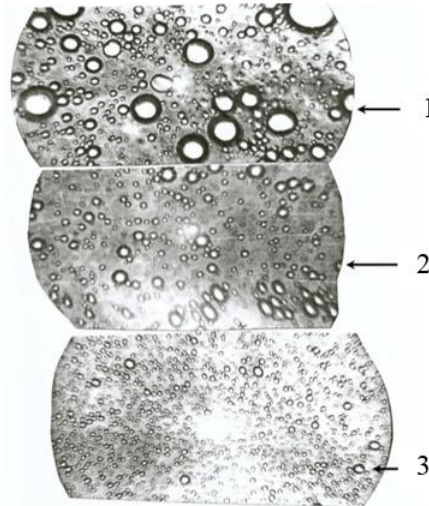


Рис. 4. Микрофотографии рабочей жидкости, приготовленной с помощью ДМП: 1 – $\chi = 0,9$; 2 – $\chi = 0,5$; 3 – $\chi = 0,2$

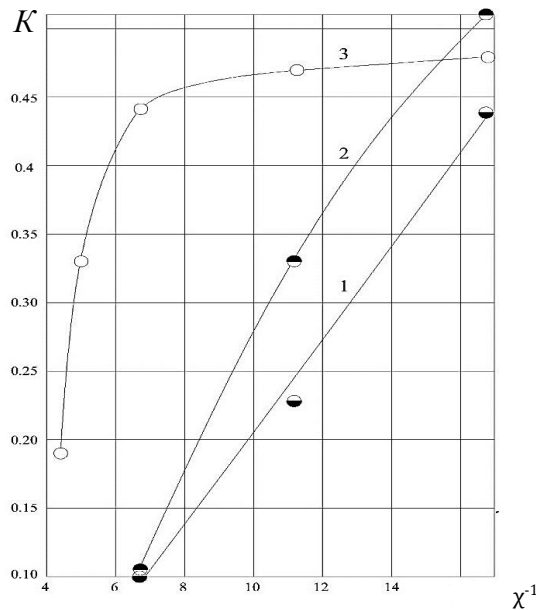


Рис. 5. Зависимость критерия неоднородности эмульсии K от обратной величины обобщенного критерия кавитации χ^{-1} при различных величинах зазора δ :
1 – $\delta = 0,069$ мм; 2 – $\delta = 0,138$ мм; 3 – $\delta = 0,21$ мм

На рис. 6 изображены графики плотности вероятности распределения капель эмульсии по размеру их диаметров. Графики построены по результатам анализа

микрофотографий, демонстрирующих различные величины обобщенного критерия кавитации.

Распределение капель эмульсии по размеру диаметров представляет наиболее полную характеристику рабочей жидкости. Из графиков видно, что мода распределения расположена в диапазоне до 2 мкм, что характеризует полученную рабочую жидкость как высококачественную.

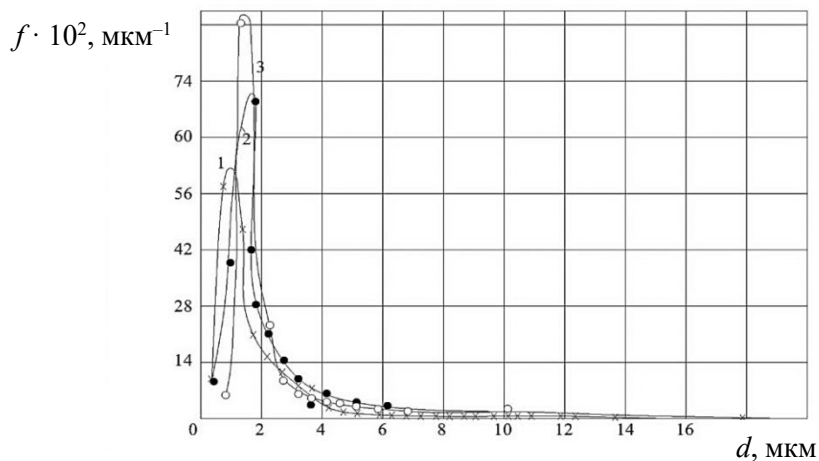


Рис. 6. Зависимость плотности вероятности распределения капель эмульсии от размеров их диаметров при различных величинах обобщенного параметра кавитации χ : 1 – $\chi = 0,27$; 2 – $\chi = 0,3$; 3 – $\chi = 0,37$

На рис. 7 представлена зависимость дисперсности эмульсии от квадрата расходной скорости в патрубках статора при различных величинах зазора между рабочими поверхностями ротора и статора (графики также построены по результатам анализа микрофотографий).

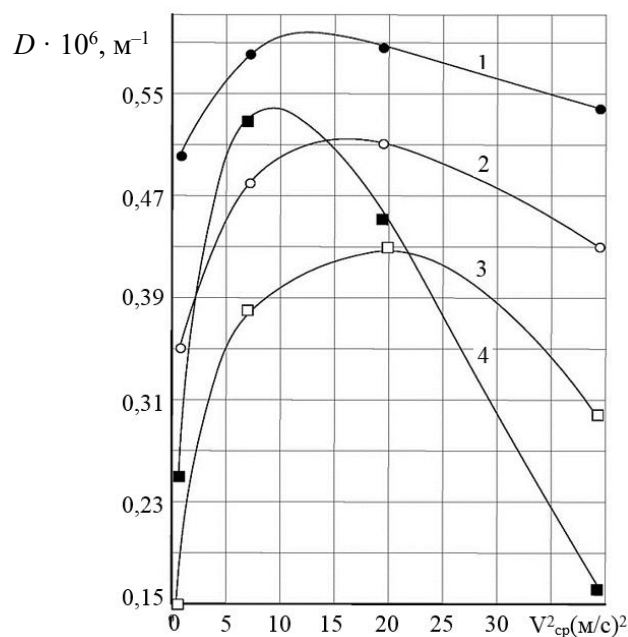


Рис. 7. Зависимость дисперсности эмульсии от квадрата расходной скорости в патрубках статора при различных величинах зазора δ

- между рабочими поверхностями ротора и статора:
- 1 ($\delta = 0,069$ мм) и 3 ($\delta = 0,138$ мм) – по среднеарифметическому диаметру;
 - 2 ($\delta = 0,069$ мм) и 4 ($\delta = 0,138$ мм) – по среднеповерхностному

Из всех приведенных графиков следует, что при минимальной величине зазора между ротором и статором получаем максимальную дисперсность рабочей жидкости. На графиках около нуля представлен докавитационный режим, крайняя точка справа на кривой 4 – суперкавитационный режим, пиковая область – оптимальный режим (различный для разных зазоров).

На рис. 8 изображены зависимости среднеарифметической дисперсности распределения капель и среднеповерхностной дисперсности от обратной величины обобщенного критерия кавитации при различной величине зазора. Здесь явно прослеживается оптимальный режим, различный для разных зазоров (пиковые по дисперсности точки расположены слева), и суперкавитационный (он показан на графиках 3, 5, крайние точки справа).

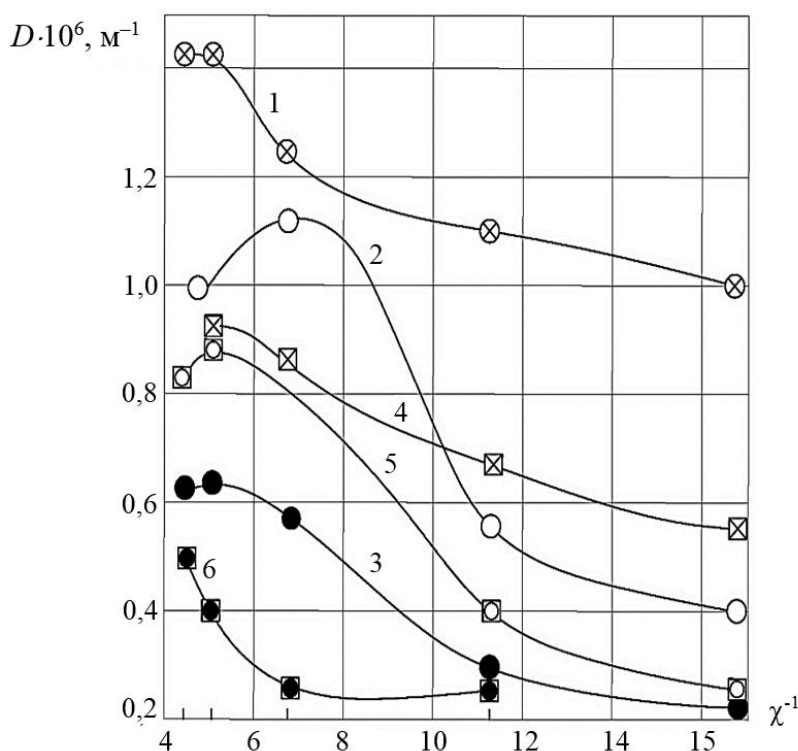


Рис. 8. Зависимость среднеарифметической дисперсности распределения капель (кривые 1, 2, 3) и среднеповерхностной дисперсности (кривые 4, 5, 6) от обратной величины обобщенного критерия кавитации при различных величинах зазора δ между ротором и статором диспергатора: 1, 2, 3 – $\delta = 0,069$ мм; 4, 5, 6 – $\delta = 0,207$ мм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обоснована необходимость применения диспергаторов с модуляцией потока для приготовления рабочей жидкости механизированных крепей.

Установлено, что обобщенный критерий кавитаций, когда интенсивность эмульгирования является максимальным, зависит от содержания свободного газа.

Разработаны ячеечная математическая модель равномерно распределенных пузырей свободного газа, синхронно колеблющихся как ансамбль точечных источников

звука типа «монополь»; семиблочный экспериментальный стенд для исследования процесса эмульгирования рабочей жидкости механизированной крепи при различных параметрах ДМП, на котором получена рабочая жидкость со среднеарифметическим диаметром частиц около 2 мкм при удельном расходе энергии 0,4 кВт·ч/м³, удельной производительностью 40 (м³/ч)/м³ и удельной материалоемкостью 12 кг/(м³/ч).

Установлено, что получение рабочей жидкости с помощью ДМП возможно осуществлять непосредственно в шахте путем однократного пропускания компонентов эмульсии через аппарат, при этом дисперсность получаемой эмульсии выше на 30...50 % по сравнению с эмульсиями, получаемыми в обычных гидромеханических диспергаторах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Turuk Y.V., Lugantsev B.B., Sysoev N.I. Substantiation of Structure and Basic Design Parameters of Devices for Orienting Powered Support Relatively to Face Conveyor in Formation Plane // *Proc. of the 4-th Int. Conf. on Industrial Engineering ICIE 2018*. 2019. P. 1687–1693.

2. Сысоев Н.И., Турук Ю.В., Колесниченко И.Е., Луганцев Б.Б. Новые технические решения, направленные на повышение надежности и эффективности работы механизированных крепей при выемке угольных пластов // *Горное оборудование и электромеханика*. 2018. № 2 (136). С. 29–34.

3. Buyalich G., Byakov M., Buyalich K., Shtenin E. Development of Powered Support Hydraulic Legs with Improved Performance // *E3S Web of Conferences. 14-th International Innovative Mining Symposium, IIMS 2019*. 2019. V. 105. P. 03025.

4. Бяков М.А., Буялич Г.Д., Буялич К.Г., Увакин С.В. Исследование радиальных деформаций гидростоек двойной гидравлической раздвижности // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020. № 1. С. 133–140.

5. Панасенков Д.А., Зайцев А.П., Карташев А.Б., Пикалов Н.А., Дубинкин Д.М. Расчет гидромеханических потерь и моделирование кавитации в каналах гидравлического блока карьерного автосамосвала // *Горное оборудование и электромеханика*. 2021. № 3. С. 3–11.

6. Пашко П.Б., Яблонев А.Л. Расчет параметров диспергатора для приготовления эмульсии механизированных крепей // *Горное оборудование и электромеханика*. 2022. № 1 (159). С. 28–35.

7. Яблонев А.Л., Гусева А.М., Щербакова Д.М. Обоснование рациональных конструкций шнековых прессов фрезформовочных машин для добычи кускового торфа // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 4. С. 63–72.

8. Wu P., Bai L, Lin W, Wang X. Mechanism and Dynamics of Hydrodynamic-acoustic Cavitation (HAC) // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018. V. 49. P. 89–96.

9. Altay R., Sadaghiani A.K., Sevgen M.I., Şişman A., Koşar A. Numerical and Experimental Studies on the Effect of Surface Roughness and Ultrasonic Frequency on Bubble Dynamics in Acoustic Cavitation // *Energies*. 2020. V. 13. № 5. P. 1126.

10. Tian Cong, Wei Xiwen, Zheng Yi. The Intelligent Control of Emulsion Pump Station // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 1881. No. 2. P. 022044.

11. Пашко П.Б., Юдаев В.Ф., Балабышко А.М. Влияние газосодержания на интенсивность кавитации и дисперсность рабочей жидкости гидромеханизированных угледобывающих комплексов // *Естественные и технические науки*. 2020. № 1. С. 151–156.

12. Пашко П.Б. Обоснование параметров диспергатора для получения и регенерации эмульсии механизированных крепей // *Уголь*. 2021. № 10. С. 10–13.
13. А. С. СССР № 1247071. *Роторный аппарат* / Юдаев В.Ф., Балабышко А.М., Кобозев И.Л.; Заявл. 06.11.1985. Опубл. 30.07.1986. Бюл. № 28.
14. А. С. СССР № 238918. *Гидроакустическая сирена* / Кокорев Д.Т., Царев В.П., Юдаев В.Ф.; Заявл. 15.01.1967. Опубл. 01.01.1969. Бюл. № 10.
15. Патент РФ № 2156665. *Струйный гидродинамический излучатель акустических колебаний* / Юдаев В.Ф., Ружицкий В.П., Балабышко А.М., Ракитин А.Н., Серова М.А., Никитина Е.В.; Заявл. 12.03.99. Опубл. 27.09.2000. Бюл. № 27.
16. Buyalich G., Buyalich K., Vyakov M. Factors Determining of Lip Seal in the Sealed Gap of the Hydraulic Props of Powered Supports // *E3S Web of Conferences. 3-rd International Innovative Mining Symposium. IIMS 2018*. V. 41. P. 01045.
17. Бяков М.А., Буялич Г.Д., Буялич К.Г. Классификация факторов, оказывающих влияние на работу манжетных уплотнений гидростоек механизированных крепей // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2018. № S65. С. 29–37.

Для цитирования: Яблонев А.Л., Пашко П.Б. Обоснование конструкции диспергатора для подготовки рабочих жидкостей горных механизированных крепей // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 1 (17). С. 28–40.

JUSTIFICATION OF THE DESIGN OF A DISPERSANT FOR THE PREPARATION OF WORKING LIQUIDS OF MINING POWERED SUPPORTS

A.L. YABLONEV¹, Dr. Sc., P.B. PASHKO², Engineer

¹Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation, e-mail: alvovich@mail.ru

²LCD «Peak Mining»,
36, buil. 12, Bolshaya Novodmitrovskaya str., Moscow, 127015, Russian Federation

The efficiency of mining hydromechanized roof supports is largely determined by the quality of working fluids – emulsions. The use of water-soluble imported emulsol for their preparation is currently constrained by the cost of the latter and difficulties in logistical terms, especially given the fact, that a very large number of mining enterprises have old, heavily worn rock supports with increased emulsion consumption. To solve this problem, a flow modulating dispersant was developed, the principle of which is based on cavitation for intensive mixing of water and emulsol. A stand was built with an experimental dispersant and an emulsion was prepared, consisting by volume of 98 % water and 2 % domestic emulsol. An analysis of the obtained working fluid, carried out using an electron microscope, showed, that this emulsion has a 30...50 % higher dispersion, than traditional emulsions, prepared using known hydromechanical dispersants.

Keywords: mining powered support, dispersant, working fluid, flow modulation, hydrodynamic cavitation, acoustic cavitation, dispersion.

Поступила в редакцию/received: 24.10.2022; после рецензирования/revised: 11.11.2022;
принята/accepted: 18.11.2022

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.518.3

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПОДГОТОВКИ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА С ЗАДАНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ

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 шоссе, 11, e-mail: igblagov@mgupp.ru

© Кайченов А.В., Ерещенко В.В.,
Яценко В.В., Благовещенский И.Г., 2023

Рассмотрен программно-аппаратный комплекс для автоматического управления процессом подготовки сушильного агента с заданными параметрами температуры и влажности. Аппаратная часть включает одноплатный компьютер, датчики температуры и влажности, платы управления холодильной машиной и заслонками, платы связи. Программная составляющая комплекса содержит модули опроса датчиков, управления холодильной машиной, расчета степени открытия заслонки, управления обменом данными. Представлено математическое описание процессов нагрева, охлаждения, осушения, увлажнения и смешивания потоков воздуха, которое послужило основой для модуля визуализации в виде интерактивной I-d-диаграммы, позволяющей рассчитывать параметры процессов увлажнения, нагрева, охлаждения и смещения сушильного агента. Приведены результаты экспериментов по адиабатическому увлажнению и нагреву одной секции малогабаритной сушильной установки УПОР-М.

Ключевые слова: программно-аппаратный комплекс, автоматическое управление, сушильный агент, математическое описание, интерактивная I-d-диаграмма.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-1-41-53

ВВЕДЕНИЕ

Продовольственная безопасность страны является одним из самых важных элементов национальной безопасности. Для ее достижения необходимо иметь стабильное внутреннее производство, создать резервы (запасы) продуктов. При выпуске новой пищевой продукции важной составляющей выступает не только разработка новых технологий, но и соблюдение правил транспортировки и хранения, поэтому одна из задач пищевой промышленности – сохранение продуктов без потерь.

В документе «Стратегия развития рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года» предполагается, что увеличение эффективности рыбоперерабатывающих мощностей может быть достигнуто при операционной

эффективности и качественной переработке водных биологических ресурсов, получении добавленной стоимости. Возрастанию операционной действенности будет способствовать рост ряда показателей, в том числе энергоэффективности, и сокращение ручного труда за счет автоматизации процессов [1].

Способы переработки продуктов включают в себя отдельные технологические процессы, которые зависят от многих параметров, в частности типа и качества сырья, вида продукции, готовности к потреблению и др.

В производстве копченой и сушеной пищевой продукции (обезвоживание, сушка) удаление влаги, как правило, является обязательной операцией; эта операция представляет собой достаточно энергоемкий этап. Разработка режимов обезвоживания (копчения) зачастую сопряжена с изменением параметров воздуха, поступающего в установку из производственного цеха. Изменение параметров часто зависит от температуры и влажности окружающей среды, их колебаний, варьирования цеховых условий при обработке сырья. Все эти факторы обуславливают подбор параметров режимов обезвоживания.

Вопросам математического моделирования систем управления кондиционированием воздуха, прогнозированию качества обезвоживания сырья исследователи уделяют значительное внимание [2–8]. Разработка технических средств автоматизации процессов обезвоживания сырья является актуальной задачей. Решение этой задачи связано с системами подготовки сушильного агента, обладающими требуемыми параметрами температуры и влажности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является программно-аппаратный комплекс для малогабаритной сушильной установки поиска оптимальных технологических режимов УПОР-М, позволяющий разработать особый режим обезвоживания для конкретного продукта вне зависимости от климатического региона и времени года [9, 10].

Программно-аппаратный комплекс УПОР-М, в основе которого лежит переменный способ сушки, состоит из сушильной камеры, холодильной машины и воздухоподогревающей системы, а также программно-реализованной системы автоматического управления на базе одноплатного компьютера.

При осуществлении переменного способа весь процесс разбивается на несколько частей, каждая часть – на интервалы, которые состоят из периода сушки и периода релаксации. Длительность периода режима зависит от свойств продукта, температуры внутри продукта и заданных параметров для этого режима [9, 10].

Установка работает в двух режимах:

обезвоживания, при котором обеспечиваются высокая температура (до 30 °С) и низкая влажность;

релаксации, при котором обеспечиваются низкая температура (15...18 °С) и высокая влажность.

В режиме обезвоживания (рис. 1а) центробежный вентилятор подает сушильный агент из камеры сушки на испаритель, конденсируя содержащуюся в нем влагу, которая стекает в накопительную емкость, затем осушенный холодный воздух разбивается на два потока. Один поток, проходя через регулирующую систему управления заслонку, подается на часть конденсатора холодильной машины, где нагревается до необходимой температуры. При этом вентилятор охлаждения основной части конденсатора уменьшает расход охлаждающего воздуха из окружающей среды. Нагретый сухой воздух смешивается с холодным сухим воздухом. Полученный в

результате этого сухой теплый воздух проходит через ТЭН донагрева и возвращается в камеру сушки [9, 10].

В режиме релаксации (рис. 1б) система управления обеспечивает поддержание заданного тепловлажностного режима путем регулирования пуска и останова компрессора холодильной машины и работы ультразвукового парогенератора. При работе компрессора центробежный вентилятор подает сушильный агент из камеры сушки на испаритель. Влага, содержащаяся в воздухе, стекает в накопительную емкость. Осушенный холодный воздух возвращается в камеру сушки. Заслонка подачи холодного сухого воздуха в контуре нагрева на этом этапе полностью закрыта, а вентилятор охлаждения основной части конденсатора имеет максимальный расход охлаждающего воздуха из окружающей среды. При останове компрессора центробежный вентилятор продолжает работу и обеспечивает рециркуляцию сушильного агента. Включение в работу ультразвукового парогенератора повышает влагосодержание сушильного агента. Увлажненный сушильный агент проходит через ТЭН донагрева и возвращается в камеру сушки.

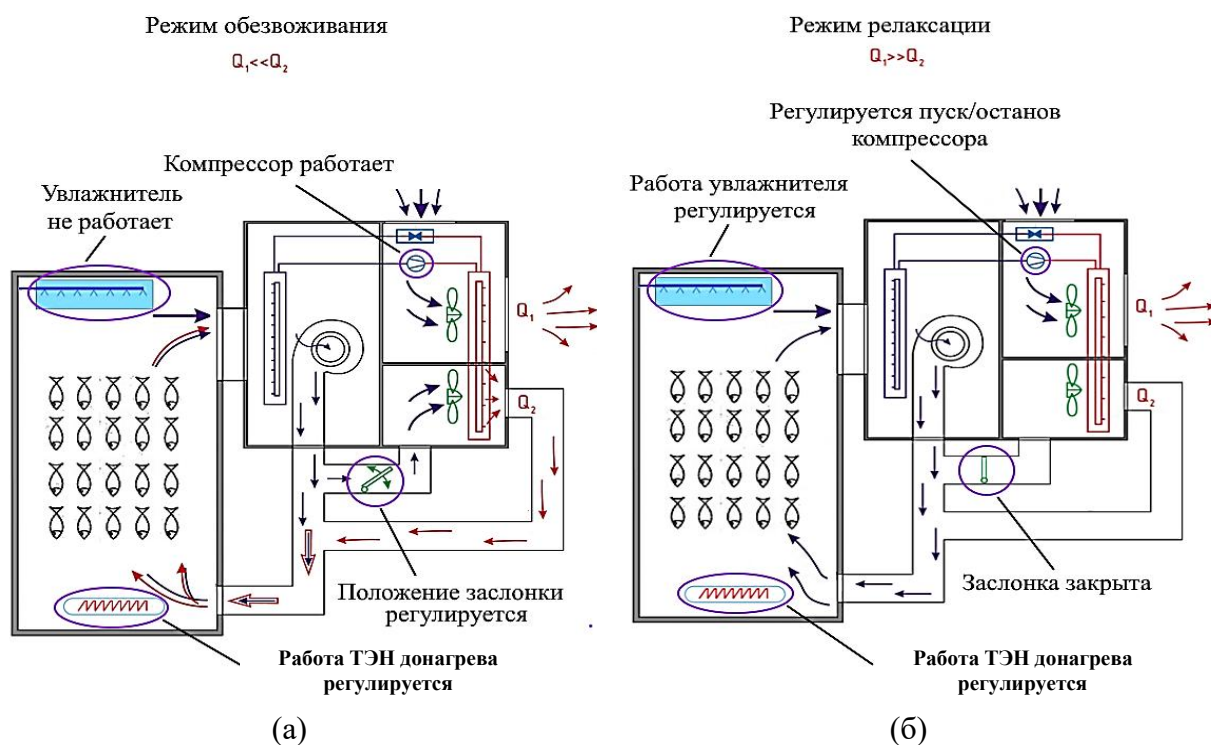


Рис. 1. Режимы работы программно-аппаратного комплекса: в режиме осушения (а); охлаждения (б)

Управление температурой, влажностью и скоростью потока осуществляется в соответствии с заранее заданной программой эксперимента. Технологические данные (по температуре, влажности, скорости потока, потреблению энергии) регистрируются и архивируются для последующего анализа.

Процесс получения сушильного агента с заданной температурой и влажностью представляет собой по сути тепловлажностную обработку воздуха. Было составлено математическое описание основных операций обработки: нагрева, охлаждения, осушения, увлажнения и смешивания двух потоков.

Для определения параметров воздуха в результате тепловлажностной обработки воздуха используют I-d-диаграмму, разработанную российским ученым Леонидом

Константиновичем Рамзиным, и ее аналоги: диаграмму Молье, разработанную немецким теплотехником Рихардом Молье, или диаграмму Кэрриера (также называемую психрометрической диаграммой, диаграммой Гросвенора) [7, 8, 11].

I-d-диаграмма – диаграмма в косоугольной системе координат, на которую нанесены линии температуры по сухому t и влажному t_m термометру, энтальпии i , влагосодержание d и дуги относительной влажности воздуха φ , %. Горизонтальной осью на этой диаграмме является влагосодержание d , вертикальной – температура по сухому термометру t , а под наклоном к горизонтальной оси – энтальпия i . Осью переходящей от вертикального направления к горизонтальному является относительная влажность воздуха φ , %. I-d-диаграмма построена для нормального атмосферного давления. Она связывает все основные параметры влажного воздуха и позволяет определить состояние воздуха по известным двум показателям: температуре и относительной влажности; относительной влажности и энтальпии; температуре и влагосодержанию и т. д.

По I-d-диаграмме можно найти восемь параметров влажного воздуха: температуру по сухому и влажному термометру, точку росы, давление воздуха, парциальное давление водяного пара, влагосодержание, относительную влажность, энтальпию.

Температура по сухому термометру представляет собой температуру влажного воздуха, измеренного с помощью термометра, свободно контактирующего с воздухом.

Температура по мокрому термометру показывает температуру, которую достигнет ненасыщенный влажный воздух в результате адиабатного тепло- и массообмена с водой, точка росы – температуру, до которой влажный воздух должен быть охлажден, чтобы стать насыщенным водяным паром.

Давление воздуха демонстрирует барометрическое давление влажного воздуха и определяется высотой над уровнем моря. Величина барометрического давления равна сумме парциального давления сухого воздуха и парциального давления водяного пара.

Парциальное давление водяного пара показывает, какое давление имел бы водяной пар, находящийся во влажном воздухе, если бы он один занимал объем, равный объему этого влажного воздуха, при той же температуре.

Парциальное давление сухого воздуха зависит от температуры воздуха, а парциальное давление водяного пара – от температуры воздуха и содержания влаги в нем. Парциальное давление водяного пара может быть найдено по формулам:

$$p_n = 611,21 \cdot e^{\left(18,678 - \frac{t}{234,5}\right) \cdot \frac{t}{257,14+t}} \text{ при } t \geq 0;$$

$$p_n = 611,15 \cdot e^{\left(23,036 - \frac{t}{333,7}\right) \cdot \frac{t}{279,82+t}} \text{ при } t < 0,$$

где p_n – максимальное значение абсолютной влажности, г/м³.

Абсолютная влажность – отношение массы водяного пара $m_{\text{вод. пара}}$ во влажном воздухе к массе сухого воздуха в некотором объеме воздуха $V_{\text{воздуха}}$:

$$p = m_{\text{вод. пара}} / V_{\text{воздуха}}.$$

Относительная влажность показывает соотношение количества влаги, которое находится в воздухе, и ее максимально возможного количества. Определяется эта влажность по формуле

$$\varphi = (p / p_n) \cdot 100 \%,$$

где p – текущее значение абсолютной влажности, г/м³.

Влажесодержание влажного воздуха – это отношение массы пара M_n к массе (объему) сухого воздуха $M_{c.в.}$:

$$d = M_n / M_{c.в.}$$

Удельная энтальпия влажного воздуха – параметр, показывающий, какое количество теплоты, отнесенное к 1 кг сухого воздуха, содержится во влажном воздухе при заданной температуре и давлении. Формула определения энтальпии i по температуре t и влажесодержанию d :

$$i = (1,01 + 0,001\ 97 \cdot d) \cdot t + 2,493 \cdot d.$$

Нагрев воздуха при прохождении его через различные нагревательные устройства из состояния с параметрами t_A и d_A до состояния с параметрами t_B и d_B происходит без изменения его влажесодержания, то есть $d_A = d_B = \text{const}$ (рис. 2), и с уменьшением относительной влажности φ .

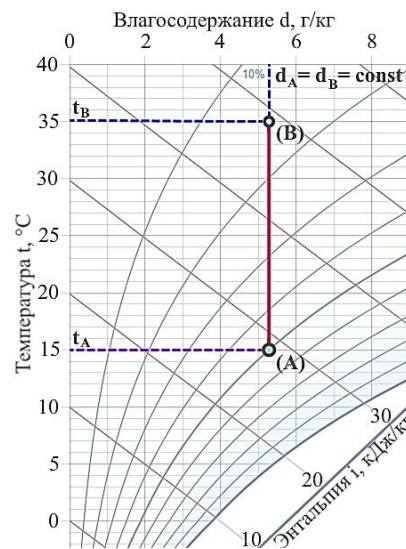


Рис. 2. Процесс нагрева на I-d-диаграмме влажного воздуха

Процесс идеального охлаждения воздуха при прохождении его через различные охлаждающие устройства из состояния с параметрами t_A и d_A до состояния с параметрами t_B и d_B происходит также без изменения его влажесодержания (также $d_A = d_B = \text{const}$) (рис. 3а) и с увеличением относительной влажности φ .

Однако после того как воздух оказывается насыщенным (точка B' , где $\varphi = 100\%$), дальнейшее охлаждение сопровождается конденсацией пара и уменьшением влажесодержания (рис. 3б) на величину

$$\Delta d = d_A - d_B, \text{ г/кг.}$$

Процесс реального охлаждения воздуха сложный, то есть состоит из двух других (рис. 3в): охлаждения части воздуха, соприкасающегося с охлаждающей поверхностью до температуры этой поверхности, и смешивания потоков воздуха, а именно того, который соприкоснулся с охлаждающей поверхностью (точка B), и того, который избежал контакта с этой поверхностью (точка A). Результат смешивания (точка C) зависит от конструктивных особенностей охладителя.

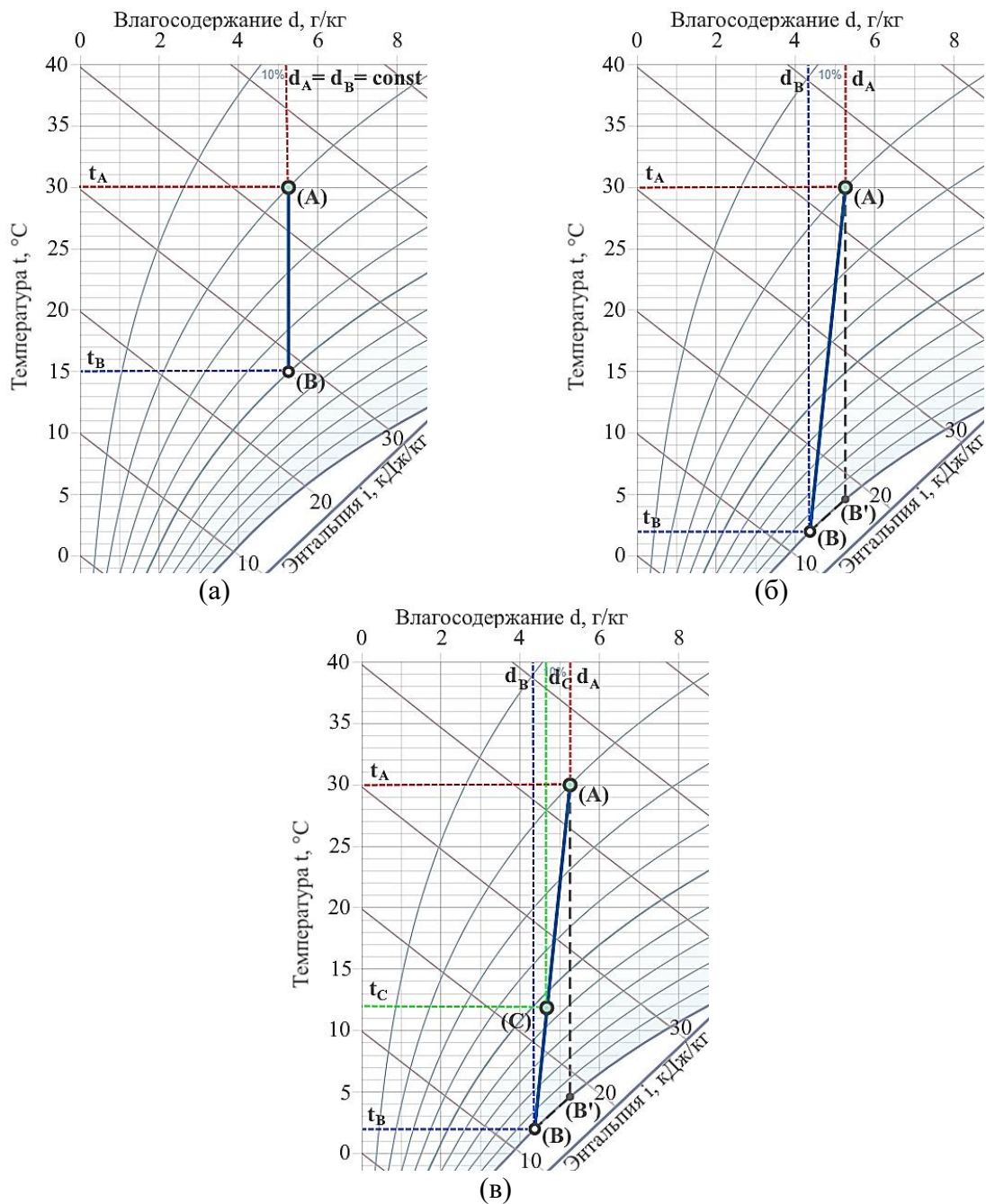


Рис. 3. Процесс охлаждения на I-d-диаграмме влажного воздуха:
идеальное охлаждение без изменения влагосодержания (а);
идеальное охлаждение с изменением влагосодержания (б);
реальное охлаждение (в)

Процесс смешения потоков воздуха с параметрами i_A , d_A , G_A и параметрами i_B , d_B , G_B , представляет собой прямую линию, соединяющую точки с этими параметрами (рис. 4). Точка С характеризует результат смешивания и находится на расстоянии, обратно пропорциональном массам смешиваемых частей воздуха. Количество смеси G_C определяют из уравнения материального баланса:

$$G_C = G_A + G_B.$$

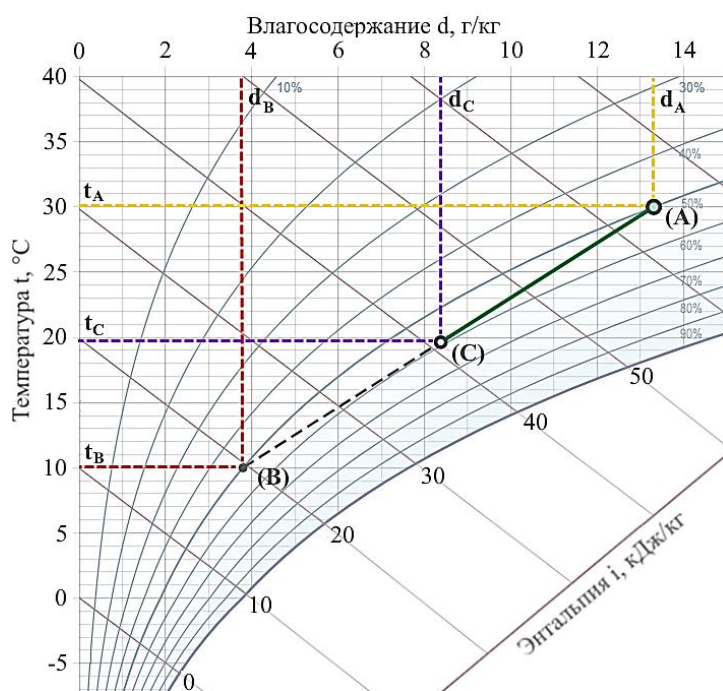


Рис. 4. Процесс смешения на I-d-диаграмме влажного воздуха без выпадения конденсата

Параметры смеси находим по уравнениям теплового и влажностного балансов:

$$G_A \cdot i_A + G_B \cdot i_B = G_C \cdot i_C;$$

$$G_A \cdot d_A + G_B \cdot d_B = G_C \cdot d_C;$$

$$i_C = \frac{G_A \cdot i_A + G_B \cdot i_B}{G_A + G_B};$$

$$d_C = \frac{d_A \cdot G_A + d_B \cdot G_B}{G_A + G_B},$$

где i_A , i_B – энтальпии смешиваемых потоков воздуха, кДж/кг; G_A , G_B – массы смешиваемых потоков воздуха, кг; d_A , d_B – влажностности смешиваемых потоков, г/кг.

Поскольку направление линии процесса смешения известно, то достаточно выполнить расчет одного из параметров точки смеси (i_C или d_C). Точка C делит отрезок $A-B$ в отношении, обратном пропорциональном смешиваемым количествам. Положение точки C можно определить также из отношения отрезков линии смеси:

$$\frac{AC}{CB} = \frac{G_B}{G_A}.$$

В случае когда линия смеси пересекает область тумана (линия A_1-B_1 на рис. 5), то смешение потоков воздуха происходит с выпадением конденсата. Принимают, что действительное положение точки смеси находится на линии насыщения $\phi = 100\%$ при той же энтальпии (точка C_1).

включения/выключения холодильной машины;
обмена данными между аппаратными, составляющими системы по протоколу ModbusRTU через интерфейс RS-485/RS-232;

модуль расчета и визуализации тепловлажностной обработки сушильного агента.

Аппаратная часть программно-аппаратного комплекса включает в себя одноплатный компьютер, датчики температуры и влажности, платы управления холодильной машиной и заслонками, платы связи.

Модуль расчета и визуализации тепловлажностной обработки сушильного агента в виде интерактивной I-d-диаграммы позволяет рассчитывать и визуализировать такие операции, как увлажнение, нагрев, охлаждение и смешение, используя теоретические модели процессов, а также выдавать управляющие воздействия исполнительным механизмам системы управления. Окно задания типа обработки и параметров влажного воздуха интерактивной I-d-диаграммы представлено на рис. 7.

Для проверки правильности расчетов теоретической модели проведены эксперименты по адиабатическому увлажнению (рис. 8а) и нагреву (рис. 8б) одной секции установки «УПОР-М».

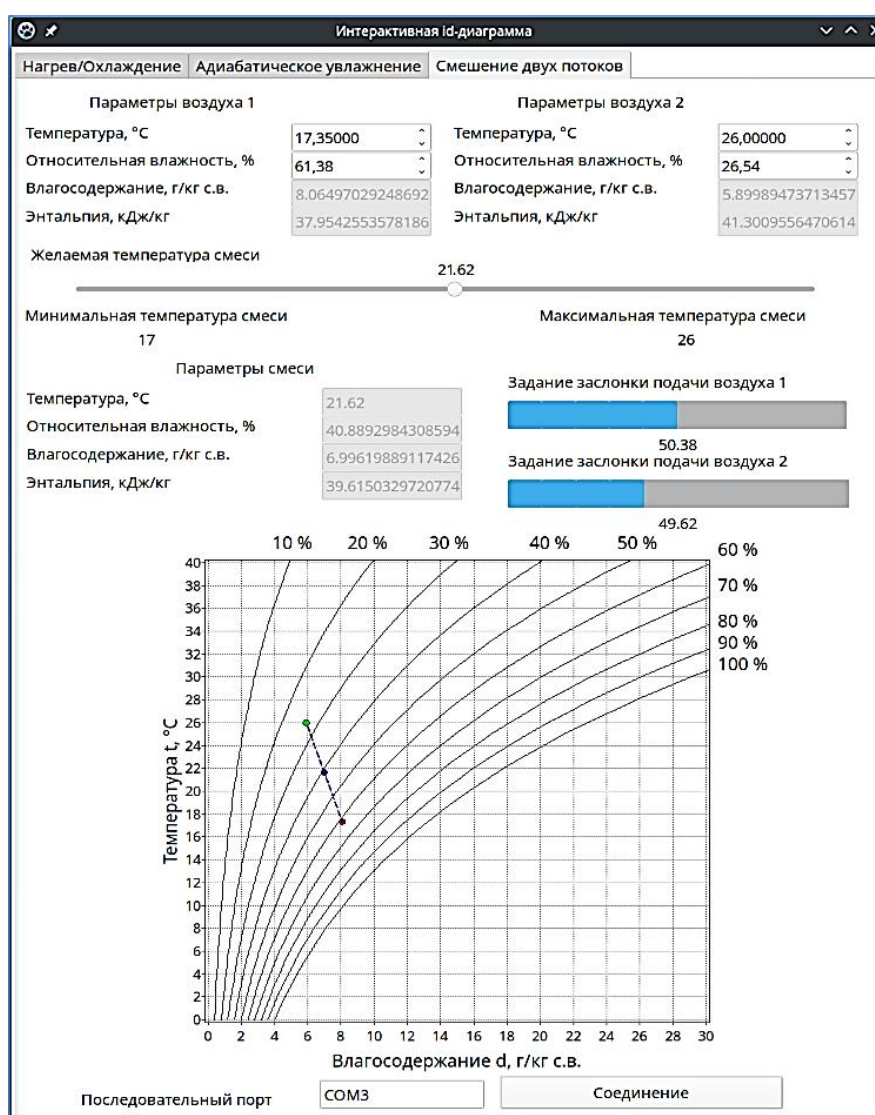


Рис. 7. Окно задания типа обработки и параметров влажного воздуха

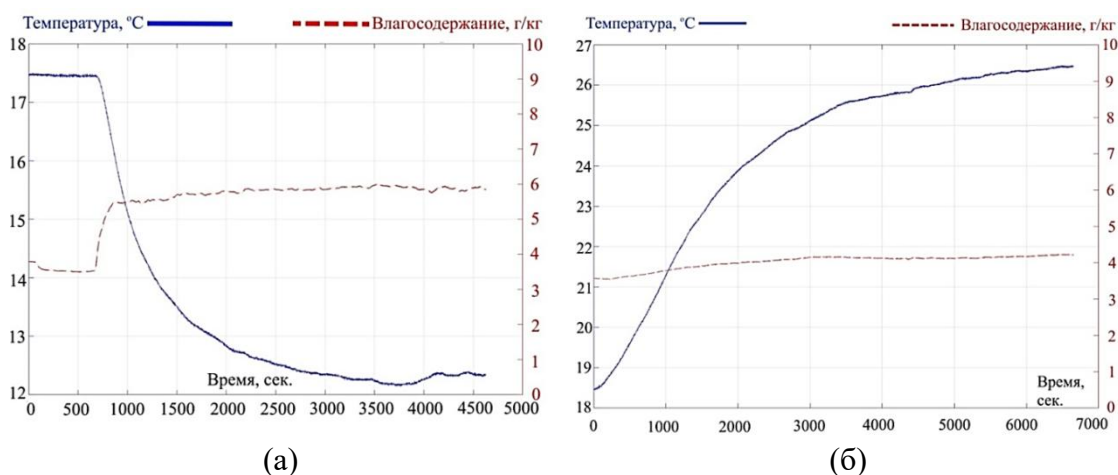


Рис. 8. Результаты эксперимента: по адиабатическому увлажнению (а); по нагреву (б)

Увлажнение с использованием ультразвуковых увлажнителей представляет собой адиабатический метод распыления воды. Для определения параметров воздушной смеси при изменении относительной влажности от начального φ до конечного φ необходимо задать параметры исходного состояния этой смеси, после чего можно изменять относительную влажность смеси и наблюдать ее состояние. I-d-диаграмма для адиабатического увлажнения при начальных параметрах воздуха (17,46 °C и 3,78 г/кг влагосодержания) и конечных (12,3 °C и 5,9 г/кг влагосодержания) представлена на рис. 9а. Красным цветом показан отрезок, соединяющий начальные и конечные параметры воздуха, желтым цветом выделены результаты эксперимента. Отклонение теоретически рассчитанных значений от экспериментальных по температуре не превышает 2 и 5 % по влагосодержанию.

При проведении эксперимента нагреватель был выключен, вытяжной вентилятор включен на 100 % производительности, при этом увлажнитель включен на 100 % производительности. Результаты эксперимента показали соответствие теоретического описания процесса адиабатического увлажнения, полученного с применением I-d-диаграммы (рис. 9а, см. рис. 8а).

Для определения параметров воздушной смеси после операции нагрева или охлаждения необходимо ввести текущие параметры смеси, после чего задать желаемую температуру. I-d-диаграмма для нагрева при начальных параметрах воздуха (18,42 °C и 3,78 г/кг влагосодержания) и конечных (26,5 °C и 4 г/кг влагосодержания) представлена на рис. 9б. Красным цветом показан отрезок, соединяющий начальные и конечные параметры воздуха, желтым цветом выделены результаты эксперимента. Отклонение теоретически рассчитанных значений от экспериментальных по температуре и влагосодержанию не превышает 1 %.

Проведены эксперименты по нагреву одной секции установки УПОР-М. При проведении эксперимента нагреватель был включен на 100 % мощности (250 Вт), вытяжной вентилятор – на 100 % производительности, а увлажнитель выключен. Результаты эксперимента представлены на рис. 9б. Результаты показали соответствие теоретического описания процесса нагрева, полученного с применением I-d-диаграммы (рис. 9б, см. рис. 8б). Экспериментальные данные сопоставлены с результатами расчета параметров воздуха в веб-приложениях [12, 13].

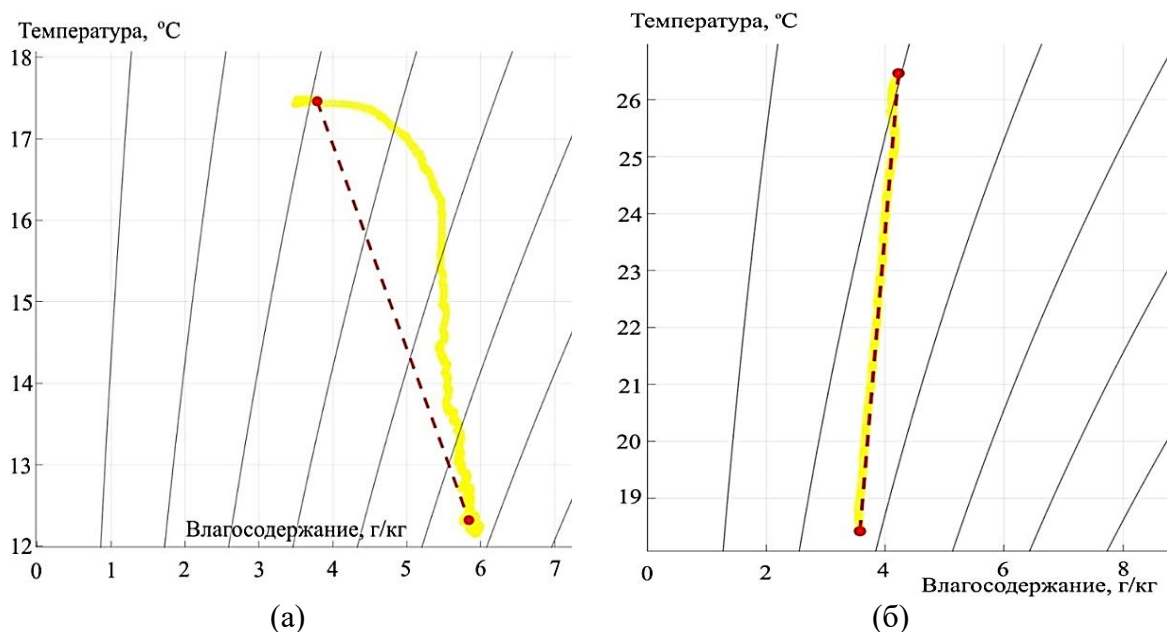


Рис. 9. Графический интерфейс модуля расчета параметров I-d-диаграммы для адиабатического увлажнения (а); процесса нагрева или охлаждения (б)

Программно-аппаратный комплекс позволяет осуществлять подготовку сушильного агента и при этом обеспечивать параметры температуры и влажности в соответствие с теоретическими моделями. Применение данного комплекса решает проблему изменения параметров воздуха, поступающего в установку из производственного цеха. Отметим, что разработка режимов обезвоживания сырья может быть проведена при постоянных (заданных) параметрах сушильного агента. Анализ результатов экспериментов по увлажнению и нагреву показывает более слабую зависимость влагосодержания от изменения температуры при нагреве, чем при относительной влажности. Использование данной закономерности позволяет управлять технологическими процессами обезвоживания сырья по влагосодержанию, что дает возможность избежать сильной взаимосвязанности контуров управления температуры и влажности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований в программной части программно-аппаратного комплекса реализована теоретическая модель температурно-влажностных процессов. Проведены эксперименты по подтверждению результатов теоретической модели. Отклонение результатов модели от экспериментальных данных не превышает 5 %.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-26-20116, <https://rscf.ru/project/22-26-20116/>

ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегия развития рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/563879849> (дата обращения: 11.08.2022).

2. Журтаева З.Д., Власенко О.М. Моделирование системы управления тепловым режимом сушильной установки. *Сборник научных трудов кафедры автоматики и промышленной электроники*. М.: Московский государственный университет дизайна и технологии. 2016. С. 27–30.
3. Земцовский А.Е., Сидоров Г.И. Разработка концепции математической модели прогнозирования качества сушки пиломатериалов // *Системы. Методы. Технологии*. 2017. № 2 (34). С. 129–132.
4. Власенко О.М., Тимохин А.Н., Захаркина С.В., Масанов Д.В. Моделирование многосвязной системы управления кондиционированием воздуха в цехе производства полимерных материалов // *Дизайн и технологии*. 2020. № 77 (119). С. 68–77.
5. Сорокин А.С., Власенко О.М. Оптимизация работы системы Центрального кондиционера воздуха. *Сборник научных трудов кафедры автоматики и промышленной электроники*. М.: Московский государственный университет дизайна и технологии. 2016. С. 73–77.
6. Никитин А.А., Рябова Т.В., Поддубный Р.А., Василенок А.В. Сравнительный анализ графического и программно-ориентированного метода определения параметров влажного воздуха. *Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке: Материалы международной научно-технической конференции*. С-Пб.: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики. 2015. С. 361–363.
7. Esfandiari Nia F., van Paassen D. A Simplified Graphical Model of Air Cooler Using Mollier Diagram and Implementation in a Design Tool // *Energy Sustainability*. 2008. V. 43208. P. 145–151.
8. Schmidt U. Decision support for greenhouse climate control using a computerised Mollier diagram // *International Workshop on Models for Plant Growth and Control of Product Quality in Horticultural Production 654*. 2003. P. 187–194.
9. Ионов Н.А., Ерещенко В.В. Разработка системы подготовки воздуха для установки поиска режимов сушки пищевого сырья. *Современные эколого-биологические и химические исследования, техника и технология производств: Материалы международной научно-практической конференции*. Мурманск: Мурманский государственный технический университет. 2017. С. 133–137.
10. Ерещенко В.В., Столянов А.В., Ершов М.А., Жук А.А. Разработка климатической камеры для малогабаритной сушильной установки УПОР-М. *Наука – производству: Материалы международной научно-практической конференции*. Мурманск: Мурманский государственный технический университет. 2016. С. 43–47.
11. Аверкин А.Г., Еремкин А.И., Ежов Е.Г., Аверкин Ю.А. Столетие I-d-диаграммы влажного воздуха: устройство, применение, модернизация // *Региональная архитектура и строительство*. 2017. № 4 (33). С. 166–172.
12. hX Diagram [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tlk-energy.de/en/phase-diagrams/mollier-h-x/> (дата обращения: 11.08.2022).
13. Air Parameters Calculator [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://hvac-calculator.com/dew_point.php/ (дата обращения: 11.08.2022).

Для цитирования: Кайченев А.В., Ерещенко В.В., Яценко В.В., Благовещенский И.Г. Программно-аппаратный комплекс для автоматического управления процессом подготовки сушильного агента с заданными параметрами температуры и влажности // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 1 (17). С. 41–53.

HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR AUTOMATIC CONTROL OF THE DRYING AGENT PREPARATION PROCESS WITH PRESET TEMPERATURE AND HUMIDITY PARAMETER

A.V. KAYCHENOV¹, Cand. Sc., V.V. ERESHCHENKO¹, Sen. Lect.
V.V. YATSENKO¹, Cand. Sc., I.G. BLAGOVESHCHENSKY², Dr. Sc.

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

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

The article describes a hardware and software complex for automatic control of the drying agent preparation process with specified temperature and humidity parameters. The hardware includes a single-board computer, temperature and humidity sensor, control boards for the refrigerator and flaps, communication boards. The software component of the complex includes modules for polling sensors, controlling the refrigeration machine, calculating the degree of flap opening, and managing data exchange. A mathematical description of the processes of heating, cooling, dehumidification, humidification and mixing of air flows is presented, which served as the basis for the visualization module in the form of an interactive I-d diagram that allows calculating the parameters of the processes of humidification, heating, cooling and mixing of the drying agent. The results of experiments on adiabatic humidification and heating of one section of a small-sized drying unit UPOR-M are presented.

Keywords: hardware and software complex, automatic control, drying agent, mathematical description, interactive I-d-diagram.

Поступила в редакцию/received: 21.07.2022; после рецензирования/ revised: 05.09.2022;
принята/accepted: 12.09.2022

УДК 004.021

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ПОКООРДИНАТНОГО СПУСКА ДЛЯ ПОИСКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЦЕЛОЧИСЛЕННОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Ю.Н. МАТВЕЕВ, д-р техн. наук, А.В. ИВАНОВ, аспирант

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: matveev4700@mail.ru

© Матвеев Ю.Н., Иванов А.В., 2023

Предложен алгоритм решения задачи целочисленного программирования способом, аналогичным методу покоординатного спуска. Альтернативный алгоритм позволяет избежать трудоемкого поиска точки с помощью симплекс-метода на каждой итерации. Приведены подробное описание алгоритма, демонстрация его работы на примере задачи оптимизации с двумя параметрами, текущие ограничения

предлагаемого алгоритма, а также рассуждения по поводу возможного их устранения в дальнейших работах.

Ключевые слова: дискретная оптимизация, математическое программирование, линейное программирование, целочисленное программирование, оптимизация, алгоритм, градиентный метод, покоординатный спуск.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-1-53-62

ВВЕДЕНИЕ

Задачи целочисленного программирования (ЦП) являются частным случаем задач линейного программирования (ЛП) и находят свое применение уже достаточно долгое время, поскольку данный вид оптимизационных задач позволяет учитывать дискретность, то есть неделимость объектов. Впервые способы решения подобных задач были предложены в XX в. Джорджем Данцигом и Леонидом Канторовичем [1] и открыли возможность поиска оптимальных решений задач. Из-за того, что такие задачи оптимизации, как задача оптимального размещения [2] или задача с логическими и ресурсными ограничениями [3], требуют соблюдения целочисленности значений при поиске решения, то нахождение наиболее оптимального алгоритма решения задачи ЦП является достаточно актуальной.

В настоящее время существует два направления развития алгоритмов ЦП. Представители первого занимаются теоретическим исследованием уже существующих алгоритмов, как правило, основанных на использовании принципа релаксации, в частности алгоритмов метода отсечения и метода ветвей и границ. В рамках второго создают новые алгоритмы или разновидности уже имеющихся задач ЦП, призванных ускорять процесс решения. К данному направлению относят современные итеративные эвристические алгоритмы, такие как поиск с восхождением к вершине [4] и алгоритм имитации отжига [5], являющийся примером метода Монте-Карло [6]. Кроме того, в последнее время все более популярными становятся эвристические алгоритмы, применяющие генетический подход [7], и принципы машинного обучения [8].

К сожалению, в настоящий момент не наблюдается развития точных алгоритмов решения задач ЦП. Вместо этого используются разработанные в начале становления данной области методы, такие как метод ветвей и границ [9], а также метод отсечений и их модификации. Однако указанные методы были разработаны достаточно давно и обладают высокой вычислительной сложностью из-за итеративного подхода.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Задача ЛП в общем виде представляется в виде системы линейных уравнений и вектора коэффициентов целевой функции \bar{z} :

$$M = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,n} & b_1 \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,n} & b_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{m,1} & a_{m,2} & \cdots & a_{m,n} & b_m \end{pmatrix}; \quad \bar{z} = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{pmatrix},$$

где m – число ограничений; n – число осей координат.

В свою очередь левая часть матрицы M – это матрица A с коэффициентами уравнений ограничений, определяющих область допустимых решений, а правая – вектор \bar{b} свободных членов каждого из m уравнений:

$$A_{m,n} = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1} & a_{m,2} & \cdots & a_{m,n} \end{pmatrix}; \quad \bar{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}.$$

Определим необходимым условием для работы алгоритма поиска целочисленного решения наличие оптимального *нецелочисленного* решения в виде точки \bar{p} с координатами $(p_1 \ p_2 \ \dots \ p_n)$ в n -мерном пространстве (рис. 1). Данная точка может быть найдена любым доступным способом решения обычной задачи линейного программирования (например, симплекс-методом [10]).

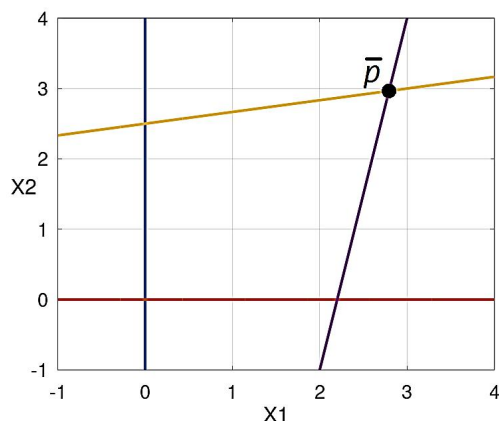


Рис. 1. Определение области допустимых решений и оптимальное решение в точке \bar{p}

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Суть алгоритма заключается во введении дополнительных целочисленных ограничений по аналогии с методом отсечений и перемещении точки оптимального решения через перерасчет одной из ее координат таким образом, чтобы она лежала на линии целочисленного ограничения. Как мы видим, перемещение точки решения аналогично перемещению, используемому в градиентном методе покоординатного спуска (по аналогии с методом Гаусса – Зейделя). Сам алгоритм состоит из следующих шагов:

- 1) выбора оси координат, на которой будет производиться поиск;
- 2) введения целочисленных ограничений для выбранной оси;
- 3) нахождения точек пересечения с целочисленными ограничениями;
- 4) отсеивания полученных точек;
- 5) выбор «опорной» точки;
- 6) определения направления движения и перемещения оптимального решения;
- 7) возврата к шагу 1, если точка оптимального решения не имеет все целочисленные координаты или находится за пределами области допустимых решений (ОДР), в противном случае алгоритм завершен.

Рассмотрим каждый из шагов подробно.

Выбор оси координат для поиска. Первым шагом алгоритма является выбор оси координат, по которой будут производиться поиск и перемещение точки, определяющей текущее временное решение. В настоящий момент оси координат выбираются по очереди в произвольном порядке (например, сначала ось x_1 , затем ось x_2 и так далее). В последующих работах будут рассмотрены особенности выбора осей координат и влияние данного выбора на сходимость алгоритма.

Введение целочисленных ограничений. После того как была выбрана одна из осей координат, в нее вводятся два целочисленных ограничения в окрестности текущей точки оптимального решения \bar{p} (рис. 2). Для этого значение координаты точки \bar{p} на выбранной оси округляется как в вверх, так и вниз.

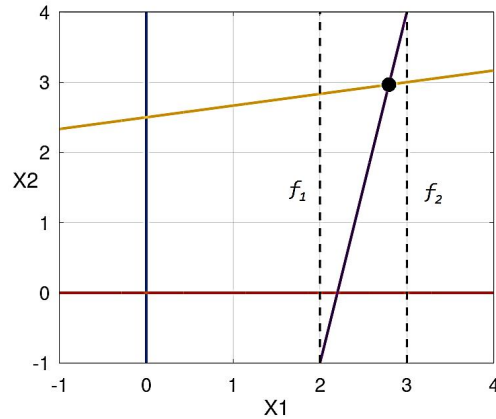


Рис. 2. Введение целочисленных ограничений в окрестности точки \bar{p} при выборе оси x_1

Нахождение точек пересечения с целочисленными ограничениями. Поскольку столбцы в матрице A соответствуют осям координат, то для того, чтобы найти набор значений координат на оси, соответствующих каждому ограничению из системы в указанной точке, достаточно решить уравнение

$$\bar{p}_i = (\bar{b} - A_{subset} \cdot \bar{p}_{subset}^T) \oslash \bar{a}. \quad (1)$$

По сути, уравнение (1) – выражение одной из координат при фиксированных остальных по аналогии с уравнением $y = kx + b \rightarrow x = -\frac{b-y}{k}$, если его записать в векторной форме. Можно заметить, что уравнение $x = -\frac{b-y}{k}$ очень схоже с уравнением (1). В нем вектор \bar{p}_i – это $-x$, вектор \bar{b} – это b , y – это $A_{subset} \cdot \bar{p}_{subset}^T$, а множитель k – это вектор \bar{a} . Здесь и далее символом « \oslash » будем обозначать поэлементное деление векторов. A_{subset} и \bar{p}_{subset} – измененные версии матрицы A и вектора \bar{p} с исключенными столбцом и элементом вектора, соответствующие оси координат i , на которой осуществляется поиск, а вектор \bar{a} – это непосредственно сам исключенный столбец из матрицы A :

$$A_{subset} = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,i-1} & a_{1,i+1} & \dots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,i-1} & a_{2,i+1} & \dots & a_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1} & a_{m,2} & \dots & a_{m,i-1} & a_{m,i+1} & \dots & a_{m,n} \end{pmatrix};$$

$$\bar{p}_{subset} = (p_1 \ p_2 \ \dots \ p_{i-1} \ p_{i+1} \ \dots \ p_n);$$

$$\bar{a} = \begin{pmatrix} a_{1,i} \\ a_{2,i} \\ \vdots \\ a_{m,i} \end{pmatrix}.$$

Результатом выражения является вектор \bar{p}_i , содержащий m элементов (по числу ограничений системы) со значениями координат для оси, на которой производится

поиск. Добавив недостающие столбцы в их соответствующие места (руководствуясь номером оси i), получим матрицу P , которая представляет собой набор точек на пересечении с каждым из ограничений при значениях координат на фиксированных осях, соответствующих вектору \bar{p}_{subset} :

$$P = \begin{pmatrix} p_1 & p_2 & \cdots & p_{i,1} & \cdots & p_n \\ p_1 & p_2 & \cdots & p_{i,2} & \cdots & p_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_1 & p_2 & \cdots & p_{i,m} & \cdots & p_n \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Например, пусть задана система ограничений:

$$\begin{cases} x_1 \geq 0 \\ x_2 \geq 0 \\ x_1 - 6x_2 \geq -15 \\ -5x_1 + x_2 \geq -11, \end{cases}$$

а точка оптимального нецелочисленного решения:

$$\bar{p} = (2,793 \quad \mathbf{2,966}).$$

Тогда матрица A и вектор \bar{b} будут выглядеть следующим образом:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & \mathbf{0} \\ 0 & \mathbf{1} \\ 1 & \mathbf{-6} \\ -5 & \mathbf{1} \end{pmatrix}; \quad \bar{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -15 \\ -11 \end{pmatrix}.$$

Жирным шрифтом выделен элемент вектора и столбец матрицы, соответствующие второй оси координат ($i = 2$), на которой будет осуществляться поиск (в данном случае это x_2 на двухмерной координатной плоскости). Все остальные оси (в данном случае только x_1) считаются зафиксированными, то есть значения координат на этих осях не изменяются во время расчетов. Вместо этого для каждой из фиксированных осей *по очереди* производится округление как вверх, так и вниз. Таким образом, строятся дополнительные ограничения, пролегающие через ближайшие целочисленные значения координат каждой фиксированной оси. В соответствии с уравнением (1) определим A_{subset} , \bar{a} и \bar{p}_{subset} :

$$A_{subset} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ -5 \end{pmatrix}; \quad \bar{a} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -6 \\ 1 \end{pmatrix}; \quad \bar{p}_{subset} = (2,966).$$

Затем рассчитаем наборы координат \bar{p}_i при $i = 2$ (поиск на оси x_2) для двух возможных вариантов, а именно с округлением **только элемента оси i** вверх и вниз (для оси x_2 это 2,966).

$$\bar{p}_2^{ceil} = (\bar{b} - A_{subset} \cdot [\bar{p}_{subset}]^T) \oslash \bar{a} =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -15 \\ -11 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ -5 \end{pmatrix} \cdot (3) \right)}{\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -6 \\ 1 \end{pmatrix}} = \frac{\begin{pmatrix} -3 \\ 0 \\ -18 \\ 4 \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -6 \\ 1 \end{pmatrix}} = \begin{pmatrix} -Inf \\ 0 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix}; \\
\bar{p}_2^{floor} &= (\bar{b} - A_{subset} \cdot \lfloor \bar{p}_{subset} \rfloor^T) \oslash \bar{a} = \\
&= \left(\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -15 \\ -11 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ -5 \end{pmatrix} \cdot (2) \right) \oslash \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -6 \\ 1 \end{pmatrix} \right) = \begin{pmatrix} -2 \\ 0 \\ -17 \\ -1 \end{pmatrix} \oslash \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -6 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -Inf \\ 0 \\ 2,83 \\ -1 \end{pmatrix}.
\end{aligned}$$

В результате получим матрицы со структурой, определенной в выражении (2):

$$P_2^{ceil} = \begin{pmatrix} 3 & -Inf \\ 3 & 0 \\ 3 & 3 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}; \quad P_2^{floor} = \begin{pmatrix} 2 & -Inf \\ 2 & 0 \\ 2 & 2,83 \\ 2 & -1 \end{pmatrix}.$$

Объединив полученные матрицы по строкам и исключив несуществующие решения (включающие бесконечность), получим набор возможных «опорных» точек для выбора дальнейшего направления движения при перемещении точки \bar{p} (рис. 3):

$$P_2 = \begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 3 & 3 \\ 3 & 4 \\ 2 & 0 \\ 2 & 2,83 \\ 2 & -1 \end{pmatrix}.$$

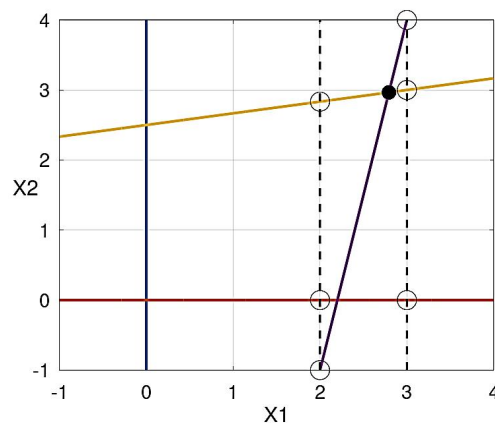


Рис. 3. Полученные точки пересечения с целочисленными ограничениями

Отсевание полученных точек. После того как были найдены точки пересечения всех ограничений с каждым из целочисленных ограничений, выбираем только те точки, которые входят в ОДР. Для этого перемножим матрицы P_2 и A^T и получим в результате матрицу B' , которая представляет собой решение относительно каждой точки, определенной в P_2 . Каждая строка B' — это вектор \bar{b}_k относительно каждой конкретной точки \bar{p}_k , где k — это номер точки из матрицы P_2 :

Вестник Тверского государственного технического университета.

Серия «Технические науки». № 1 (17), 2023

$$B' = P_2 \times A^T = \begin{pmatrix} 3 & 0 & 3 & -15 \\ 3 & 3 & -15 & -12 \\ 3 & 4 & -21 & -11 \\ 2 & 0 & 2 & -10 \\ 2 & 2,83 & -15 & -7,16 \\ 2 & -1 & 8 & -11 \end{pmatrix}.$$

Узнать, какие точки из P_2 находятся в ОДР, можно, построив матрицу B , в которой каждая строчка является вектором \bar{b} , а число строк равно числу строк матрицы B' :

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -15 & -11 \\ 0 & 0 & -15 & -11 \\ 0 & 0 & -15 & -11 \\ 0 & 0 & -15 & -11 \\ 0 & 0 & -15 & -11 \\ 0 & 0 & -15 & -11 \end{pmatrix}.$$

Если произвести поэлементное сравнение $B' \geq B$, то получим бинарную матрицу T :

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

В матрице T номера строк, содержащих все единицы, соответствуют точкам из P_2 , находящимся в ОДР (рис. 4): $P'_2 = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 2 & 2,83 \end{pmatrix}$. Переопределим $P = P'_2$, поскольку в дальнейшем будут использоваться только точки, входящие в ОДР.

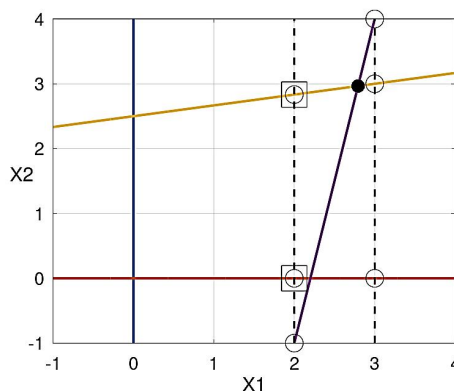


Рис. 4. Отсеянные точки, входящие в ОДР (отмечены квадратами)

Выбор «опорной» точки. Для каждой из точек, входящих в ОДР, рассчитываем значение целевой функции. В матричном виде это выглядит следующим образом:

$$\bar{z} = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_m \end{pmatrix}; \quad P = \begin{pmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \cdots & p_{1,m} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \cdots & p_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{k,1} & p_{k,2} & \cdots & p_{k,m} \end{pmatrix},$$

где \bar{z} – вектор коэффициентов целевой функции из m элементов; матрица P – это набор из k точек с m координатами, находящиеся в ОДР.

Перемножив между собой вектор коэффициентов \bar{z} и матрицу P , получим вектор \bar{j} из k элементов, где каждый элемент – это значение целевой функции в соответствующей точке:

$$\bar{j} = \bar{z} \times P^T = (j_1 \quad j_2 \quad \dots \quad j_k).$$

Определение направления движения и перемещение точки. В зависимости от того, какая задача решается (максимизации или минимизации), выбирается наибольший или наименьший элемент из вектора \bar{j} и соответствующая ему точка s (рис. 5).

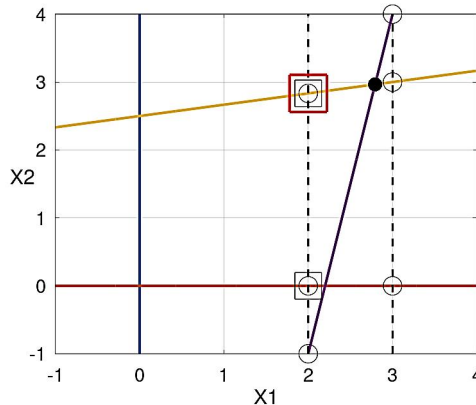


Рис. 5. Точка с наибольшим значением целевой функции

Затем для текущей оси i , на которой производится поиск, высчитывается разность между значениями координат текущей и опорной точками. Если текущую и опорную точки определить в виде векторов

$$\bar{p} = (p_1 \quad p_2 \quad \dots \quad p_n); \quad \bar{p}_{basis} = (P_{s1} \quad P_{s2} \quad \dots \quad P_{sn}),$$

тогда разность их координат можно рассчитать как

$$\Delta_i = P_{si} - p_i,$$

где i – номер текущей оси, на которой осуществляется поиск; s – номер точки, которая была выбрана в качестве базисной.

Для текущего примера

$$\bar{p} = (2,793 \quad 2,966); \quad P = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 2 & 2,83 \end{pmatrix} \rightarrow s = 2;$$

$$\Delta_i = P_{si} - p_i = 2,83 - 2,966 = -0,136; \quad i = 2.$$

В зависимости от того, является ли значение Δ_i положительным или отрицательным, происходит перемещение точки вдоль оси i либо вверх, либо вниз.

Если значение Δ_i отрицательное, то это означает то, что следующая ближайшая точка с целочисленной координатой на оси i находится *ниже*, то есть необходимо *уменьшить* значение целевой функции в задачи максимизации для того, чтобы изменить координату на оси i на целочисленную. Справедливо и обратное: если значение Δ_i положительное, то следующая ближайшая точка с целочисленным значением координаты на оси i находится *выше*, а это означает, что нужно *увеличить* значение целевой функции.

Изменение значения координаты точки на оси i происходит путем округления *вниз*, если значение Δ_i отрицательное, либо *вверх*, если значение Δ_i положительное. В случае если значение Δ_i равно нулю, то это означает, что координата точки на оси i уже является целым числом. Используя ранний пример, пересчет точки текущего решения осуществляем следующим образом (рис. 6):

$$\Delta_i = -0,136 < 0 \rightarrow \bar{p} = (2,793 \quad 2); \quad i = 2.$$

После изменения точки текущего решения проводится проверка на нахождение ее в ОДР. Если точка расположена в ОДР и все координаты точки являются целочисленными, то алгоритм считается завершенным, а целочисленное оптимальное решение – найденным. В противном случае происходит возврат на первый шаг алгоритма, он выполняется заново для нового текущего решения и другой оси координат (рис. 7).

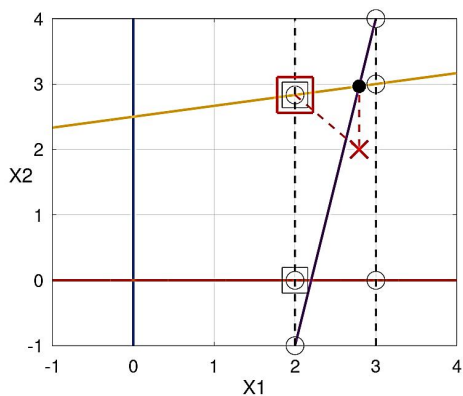


Рис. 6. Изменение значения координаты i текущего решения

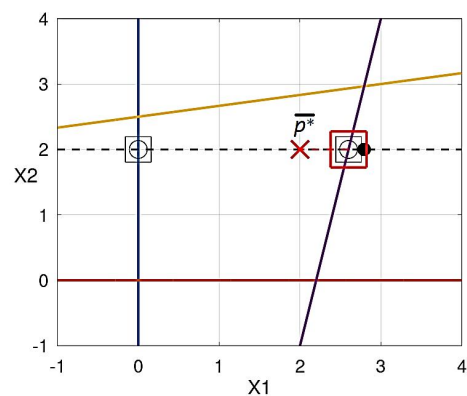


Рис. 7. Нахождение оптимального целочисленного решения \bar{p}^*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод решения задач ЦП во многих случаях позволяет избежать решения многомерной задачи с использованием симплекс-метода на каждой итерации алгоритма. В отличие от таких методов, как метод ветвей и границ и метод отсечений, предложенный алгоритм позволяет потенциально ускорить время поиска решения задачи ЦП. Однако в ходе проведенных экспериментов было отмечено, что во время выполнения вышеописанного алгоритма при перемещении точки решения и ее выходе за ОДР этот алгоритм не всегда может сойтись, а сходимость является важным требованием точности алгоритма решения задачи ЦП. Отсюда следует сделать вывод о том, что проверку выхода за ОДР точки решения нужно производить на каждом шаге алгоритма и предотвращать этот выход на этапе определения того, куда переместить точку решения. Данное требование приводит к значительному усложнению логики алгоритма, что, на наш взгляд, не является целесообразным. И хотя алгоритм, предложенный в данной работе, не является универсальным и с помощью него нельзя найти решение любой задачи ЦП, однако, на наш взгляд, очевиден тот факт, что имеет смысл поиск альтернативного подхода к поиску решения, поэтому в дальнейших статьях мы собираемся продолжить работу в данном направлении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данциг Дж.Б. Линейное программирование, его применения и обобщения / под ред. Н.Н. Воробьева. М.: Прогресс. 1966. 600 с.

2. Васильев И.Л., Климентова К.Б. Метод ветвей и отсечений для задачи размещения с предпочтениями клиентов // *Дискретный анализ и исследование операций*. 2009. Т. 16. № 2. С. 21–41.
3. Колоколов Л.А., Семерханова Е.Я. Оптимизация системы производственных услуг в условиях межфирменного взаимодействия // *Вестник СибГУТИ*. 2014. № 3 (27). С. 13–22.
4. Russell S.J., Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach* / Upper Saddle River. New Jersey: Prentice Hall. 2003. 1132 p.
5. Джонс М.Т. Программирование искусственного интеллекта в приложениях. М.: ДМК Пресс. 2004. 312 с.
6. Соболев И.М. Метод Монте-Карло. М.: Наука. 1968. 64 с.
7. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М., Сороколетов П.В. Бионспирированные методы в оптимизации. М.: Физматлит. 2009. 384 с.
8. Джонс М.Т. Программирование искусственного интеллекта в приложениях. М.: ДМК Пресс. 2004. 312 с.
9. Васильев И.Л., Климентова К.Б. Метод ветвей и отсечений для задачи размещения с предпочтениями клиентов // *Дискретный анализ и исследование операций*. 2009. Т. 16. № 2. С. 21–41.
10. Таха Хемди А. Введение в исследование операций / перевод с англ. 7-е изд. М.: Вильямс. 2005. 912 с.

Для цитирования: Матвеев Ю.Н., Иванов А.В. Использование метода покоординатного спуска для поиска решения задачи целочисленного программирования // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 1 (17). С. 53–62.

USAGE OF COORDINATE DESCENT ALGORITHM IN SEARCH OF A SOLUTION TO AN INTEGER PROGRAMMING PROBLEM

Y.N. MATVEEV, Dr. Sc., A.V. IVANOV, Postgraduate

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation, e-mail: matveev4700@mail.ru

The article proposes an algorithm for solving the integer programming problem in a way similar to the coordinate descent method. An alternative algorithm avoids the time-consuming search for a point using the simplex method at each iteration. A detailed description of the algorithm and a demonstration of its operation is given on the example of an optimization problem with two parameters. The current limitations of the proposed algorithm are given, as well as arguments about their possible use in future works.

Keywords: discrete optimization, mathematical programming, linear programming, integer programming, optimization, algorithm, gradient method, coordinate descent.

Поступила в редакцию/received: 16.08.2022; после рецензирования/ revised: 05.09.2022;
принята/accepted: 12.09.2022

МОДЕЛЬ ВИБРАЦИОННО-СИЛОВОГО ВЫРАВНИВАНИЯ ПРИ УПАКОВКЕА.Л. КАЛАБИН¹, д-р физ.-мат. наук, М.В. ТАРАЧКОВ², аспирант¹Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: akalabin@yandex.ru²Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта,
236041, Калининград, ул. А. Невского, 14, e-mail: mishklgpmi@mail.ru

© Калабин А.Л., Тарачков М.В., 2023

Приводится описание процесса создания математической модели вибрационно-силового выравнивания при упаковке охлажденных полуфабрикатов на пищевом производстве. Модель основывается на работах по выравниванию существенно меньших по размеру объектов, нежели коробка, в которой они находятся. При этом модель претерпела ряд важных изменений. Для ее построения рассматриваются две вспомогательные задачи, подводящие читателя к вопросу об условиях начала движения выравниваемых объектов, а именно задача необходимого ускорения и задача вибрационного характера перемещения. Приводятся исходные данные для расчетов (необходимая информация была получена путем анализа производственной линии по выравниванию охлажденных полуфабрикатов). Часть этих данных взята из чертежей робота-манипулятора, который является основой системы выравнивания полуфабрикатов. Осуществлены расчеты необходимой силы надавливания на полуфабрикаты, частоты вибрации, перемещения полуфабрикатов. В результате экспериментов было установлено, что построенная математическая модель выравнивания полуфабрикатов удовлетворительно адекватна. Созданная математическая модель позволила улучшить характеристики робота-манипулятора и рассчитать эффективные параметры работы системы автоматизации по выравниванию охлажденных полуфабрикатов.

Ключевые слова: вибрационное воздействие, упаковка полуфабрикатов, пищевое производство, математическое моделирование, робототехника, системы автоматического управления.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-1-63-70

Широко известна задача выравнивания сыпучего материала под действием вибрации [1, 2]. Сыпучий материал в этом случае определяют как систему, состоящую из твердых частиц произвольной формы, находящихся в контакте. К указанным материалам относят удобрения, некоторые строительные вещества (цемент), многие моющие средства. При этом размеры отдельного элемента материала во много раз меньше характерного размера всей смеси. В основе этого явления лежит вибрационное движение механической смеси по вибрирующему лотку [3]. Интересно рассмотреть ситуацию, когда объекты незначительно меньше (примерно в 5 раз) коробки, в которой они находятся.

На линии пищевого производства существуют задачи по укладке охлажденных полуфабрикатов в коробки и последующей заклеивке этой коробки. В частности, полуфабрикат, как охлажденные нагетсы укладывают в полиэтиленовые пакеты. Робот при помощи присоски кладет пакеты в коробки, что не всегда происходит корректно и пакет с нагетсами может выступать за верхний край тары. Если не выровнять пакет с нагетсами, то машина по заклеивке коробок не работает и получится брак. Поэтому

необходим участок, на котором производится выравнивание полуфабрикатов. В настоящий момент данную работу выполняют люди. Предполагается заменить их автоматической системой с использованием промышленного робота-манипулятора.

Целью данной работы является разработка модели вибрационно-силового выравнивания полуфабрикатов роботом-упаковщиком, в ходе которой будут установлены некоторые его параметры для последующей автоматизации скоростного участка производственной линии по упаковке полуфабрикатов с использованием этого промышленного робота-манипулятора.

В основе задачи выравнивания сыпучего материала [1, 2] лежит физическая задача, определяющая условие начала движения груза, лежащего на платформе.

ВСПОМОГАТЕЛЬНАЯ ЗАДАЧА 1

Физическую задачу, призванную установить условие начала движения лежащего на платформе груза, можно сформулировать так: на подвижной платформе P находится груз B массой m . С каким ускорением a_p должна двигаться платформа, чтобы груз B тоже пришел в движение?

Движение груза, который размещен на платформе, будет определять сила трения $F_{тр}$ между этим грузом и платформой.

Уравнение движения груза B запишем в неинерциальной системе отсчета (НСО) [4]. Это уравнение относительно платформы P приобретает дополнительный член с размерностью силы (точнее, эйлеровой силы инерции):

$$ma = F_{тр} - mdV(t)/dt,$$

где m – масса груза B ; a – его ускорение; $ma_p = mdV(t)/dt$ – поступательная сила инерции, возникающая из-за неинерциальной системы отсчета, которая сама движется с ускорением; $V(t)$ – растущая скорость движения платформы. Эта сила связана с линейным ускорением НСО и противоположна ему. Запишем силу трения как

$$F_{тр} = kN = kmg,$$

где k – коэффициент трения; g – ускорение свободного падения; N – нормальная сила реакции опоры (платформы).

Груз B может начать двигаться в направлении, обратном движению платформы P , при условии отрицательного ускорения $a < 0$, которое возникнет при условии $kmg < ma_p$, $a_p > kg$. Груз B переместится под воздействием инерциальной силы, большей, чем сила трения покоя. Аналогично при движении отдельных элементов сыпучего материала этот материал начинает выравниваться [1, 2]. В связи с ограниченностью такого перемещения появляется колебательное движение (вибрация).

Вернемся к описанному во введении примеру. Коробка для упаковки вмещает в себя 12 нагетсов. Замороженные нагетсы находятся в полиэтиленовом пакете, который робот помещает в коробку случайным образом. В коробку они укладываются в два слоя. Первый слой равномерно распределяется по всей площади тары. При укладке верхнего слоя бывает, что от одного до трех нагетсов образуют третий, который не позволяет закрыть упаковку. При этом необходимо разровнять третий слой, то есть сделать так, чтобы нагетсы заполнили полностью второй слой. Выравнивание считается законченным, когда нагетсы равномерно распределены по всей площади коробки и слоям и коробка закрыта.

Рассмотрим ситуацию, когда несколько нагетсов образуют вертикальный третий слой. Для выравнивания нагетсов в третьем слое создан робот (рис. 1), рабочим

органом которого является подвижная вибрирующая платформа, оказывающая давление на верхний слой наггетсов, выступающих над правильно уложенным вторым, с целью переноса наггетсов во второй или первый слой и выравнивания их по всей площади [5]. Для описания динамики этого рабочего органа рассмотрим другую физическую задачу, а именно моделирующую движение рабочего органа робота.

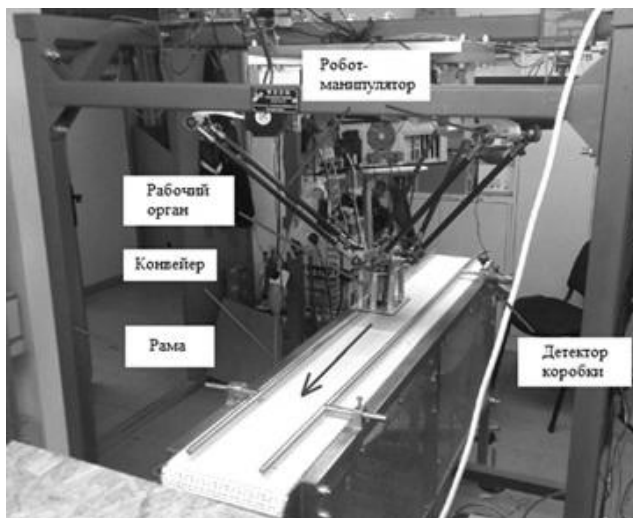


Рис. 1. Робот-манипулятор, который производит выравнивание наггетсов в коробке

ВСПОМОГАТЕЛЬНАЯ ЗАДАЧА 2

На неподвижной платформе находится груз массой m . На этот груз сверху помещена подвижная платформа P (рис. 2). Известно два коэффициента трения при движении груза (относительно нижней неподвижной k_2 и верхней подвижной платформы k_1). Верхняя платформа P давит на груз с некоторой силой F и движется с ускорением a . Как будет двигаться груз, который находится между двумя платформами?

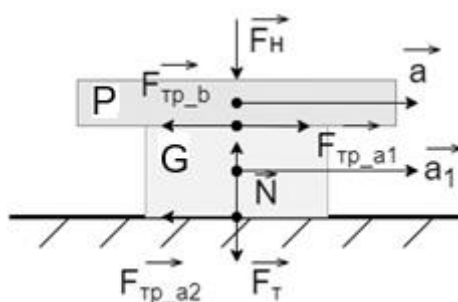


Рис. 2. Расположение наггетса G и давящей на него подвижной платформы P

Рассмотрим силы, действующие на наггетс G :

$$\begin{aligned} m\vec{a}_1 &= m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{mp_{a1}} + \vec{F}_{mp_{a2}}; \\ \vec{F}_{mp_b} &= -\vec{F}_{mp_{a1}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Запишем уравнение (1) в проекции на ось Oх:

$$ma_1 = F_{mp_{a1}} - F_{mp_{a2}}.$$

Вычислим значения каждой из сил трения по формулам (2) и (3):

$$F_{mp_{a1}} = k_1 F_n; \quad (2)$$

$$F_{mp_{a2}} = k_2 (F_n + mg), \quad (3)$$

где F_n – сила давления рабочим органом на один наггетс, которую можно рассчитать через соотношения площадей соприкасающихся поверхностей наггетса S_G и рабочего органа S_p :

$$F_n = F S_G / S_p. \quad (4)$$

Подставим значения сил трения из формул (2) и (3) в формулу (1), чтобы определить ускорение, которое необходимо придать наггетсу для его перемещения:

$$ma_1 = k_1 F_n - k_2 (F_n + mg);$$

$$a_1 = \frac{F_n}{m} (k_1 - k_2) - k_2 g. \quad (5)$$

Груз G придет в движение при условии, что его ускорение станет отличным от нуля, то есть когда сила трения между этим грузом и верхней платформой P станет больше, чем сила трения покоя, с учетом давления, оказываемого данной платформой. Эта платформа P моделирует верхнюю часть рабочего органа робота, а груз G – наггетс.

РАСЧЕТЫ УСЛОВИЯ ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ ОДНОГО НАГГЕТСА

Определим основные параметры и их численные значения для наггетсов и для робота-манипулятора, ориентируясь на задачу 2. Исходные данные для этого случая приведены в таблице.

Исходные данные для расчётов

Наименование	Значение
Масса наггетса	$m = 25 \text{ г} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$
Сила прижатия наггетсов рабочим органом	$F = 300 \text{ Н}$
Ускорение свободного падения	$g \approx 10 \text{ м/с}^2$
Длина наггетса	$a_n = 0,04 \text{ м}$
Ширина наггетса	$b_n = 0,02 \text{ м}$
Длина рабочего органа	$a_p = 0,2 \text{ м}$
Ширина рабочего органа	$b_p = 0,13 \text{ м}$
Коэффициент трения наггетса о рабочий орган	$k_1 = 0,2$
Коэффициент трения одного наггетса о другой	$k_2 = 1$

Из (4) с учетом представленных в таблице значений рассчитаем $F_n = 9 \text{ Н}$. Тогда

Вестник Тверского государственного технического университета.

Серия «Технические науки». № 1 (17), 2023

по формуле (5) ускорение груза G (в нашем случае – нагетса) будет иметь значение

$$a_1 = \frac{F_u}{m}(k_1 - k_2) - k_2 g \approx 3 \cdot 10^3 \text{ м/с}^2.$$

Величина первого слагаемого значительно больше второго, то есть сила давления рабочим органом превышает массу нагетса. В связи с пространственной ограниченностью движения нагетсов размерами коробки появляется колебательное движение.

Для увеличения вероятности перемещения нагетса третьего слоя и попадания на свободное место во втором слое колебания рабочего органа P желательно осуществлять в плоскости одновременно по двум координатам. При этом условии примерная траектория нагетса третьего слоя будет иметь вид, приведенный на рис. 3. Эта траектория покрывает почти всю поверхность третьего слоя, в том числе и свободную площадь, куда может попасть этот нагетс. Однако колебания рабочего органа P в плоскости одновременно по двум координатам сложно организовать технически, поэтому реализовано колебание по одной координате. Колебания – это способ привести нагетс в движение, как следует из задачи 2.

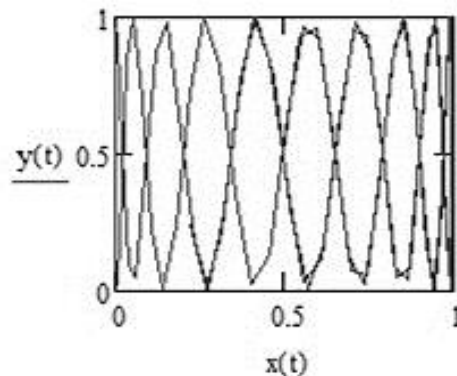


Рис. 3. Примерная траектория нагетса из третьего слоя

Рабочий орган P совершает гармонические колебания. Его перемещение описывается формулой $X_B = A \sin(\omega t)$. Тогда максимальное ускорение рабочего органа

$$a_{B_{\max}} = A\omega^2 = 4\pi^2 A\nu^2, \quad (6)$$

где A – амплитуда колебаний; ν – частота колебаний.

Допустим, что ускорения колеблющихся и прижатых друг к другу тел G и P примерно равны ускорению груза G , а в реальности ускорение нагетса – ускорению рабочего органа:

$$a_1 \approx a_B.$$

Амплитуда A колебаний рабочего органа примерно равна длине нагетса (4 см). Можно из формулы (6) рассчитать частоту колебаний рабочего органа:

$$\nu = \sqrt{\frac{a_1}{4\pi^2 A}} \approx 44 \text{ Гц.}$$

Соответственно, период колебаний примерно 0,02 с.

Рассмотрим наггетс G, который выступает за верхнюю границу коробки, и рабочий орган P, совершающий гармонические колебания и надавливание на наггетс G. Задача рабочего органа заключается в выравнивании наггетса G, чтобы он не выступал за границы коробки (рис. 4). Требуется установить зависимость между силой надавливания, частотой колебаний рабочего органа и перемещением продукта.

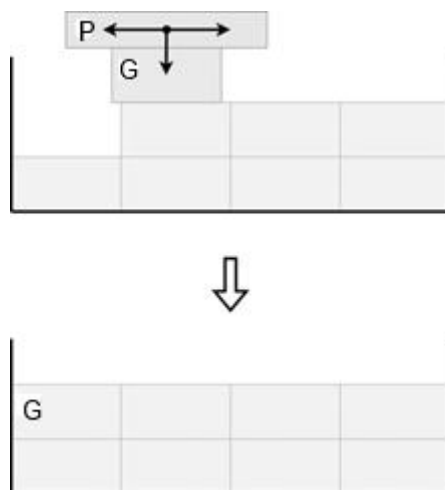


Рис. 4. Схематичное изображение процесса выравнивания наггетса G

Чтобы наггетс упал в свободное пространство коробки, проекция центра его масс должна выступить за край поверхности, на которой лежит наггетс, то есть перемещение должно составлять не менее половины длины или ширины наггетса в зависимости от его ориентации. Используя формулу связи периода колебаний с частотой и приняв во внимание, что эффективное время для перемещения наггетса – это четверть периода колебаний, определяем время, в течение которого рабочий орган воздействует на наггетс:

$$t = \frac{1}{4\nu} \approx 5 \cdot 10^{-3},$$

откуда найдем перемещение наггетса по формуле

$$S_A = \frac{a_1 t^2}{2} \approx 3,8 \text{ см.}$$

Перемещение примерно равно длине наггетса.

При скорости конвейера и коробки с наггетсами 0,56 м/с и длине рабочей зоны 0,15...0,8 м время нахождения коробки в указанной зоне составляет примерно 1,5 с. Если период колебаний рабочего органа 0,02 с, то наггетс, выступающий за второй вертикальный уровень, получит более 70 колебаний. Этого достаточно, чтобы с большой вероятностью наггетс начал двигаться и упал в свободное пространство коробки на втором уровне, что подтвердилось в ходе эксперимента.

На основе предложенной модели была получена численная оценка параметров для рабочего органа робота-упаковщика, воздействующего непосредственно на наггетс. При заданной силе давления амплитуда колебаний рабочего органа примерно равна длине наггетса (4 см). Частота колебаний находится в диапазоне 40...60 Гц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценки работоспособности робота-упаковщика были проведены эксперименты. Сначала нагетсы в коробку укладывались ручным способом, из-за чего образовывался третий слой, нарушающий правильность упаковки. Таким образом были сформированы 10 коробок. Затем они пускались на линию, на которой работал робот-упаковщик. На выходе оценивалось качество упаковки. Результат считался положительным, если в коробке оказывалось два ровных слоя, благодаря чему коробка закрывалась крышкой без всяких изъянов. Эксперимент повторяли более чем на 100 коробках: положительный результат имел место в 93 % случаев, что свидетельствовало об удовлетворительном качестве разработанной модели процесса.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность доктору физико-математических наук В.А. Мурцовкину за плодотворное обсуждение физических явлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Модель вибрационного перемещения сыпучих материалов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://industrial-wood.ru/tehnologiya-podzemnoy-dobychi-rud/17891-model-vibracionnogo-peremescheniya-sypuchih-materialov.html> (дата обращения: 20.07.2022).
2. Разделение частиц в слое сыпучего материала под действием вибрации (сегрегация, самосортирование) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://msd.com.ua/chto-mozhet-vibraciya/razdelenie-chastic-v-sloe-sypuchego-materiala-pod-dejstviem-vibracii-segregaciya-samosortirovaniye/> (дата обращения: 20.07.2022).
3. Шарлаимов В.И., Козин В.М. Экспериментальные исследования нестационарных процессов при движении сплошной среды в гравитационном поле. М.: Академия естествознания. 2007. 232 с.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики: в 5 т. Механика. М.: Наука. 1979. Т. 1. 520 с.
5. Морозов А.В., Усольцев В.М. Уплотнение дисперсных материалов рабочим органом с полигармоническим источником колебаний // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2019. Т. 2. № 4. С. 182–189.

ALIGNMENT MODEL DURING PACKAGING USING VIBRATION FORCE

A.L. KALABIN¹, Dr. Sc., M.V. TARACHKOV², Postgraduate

¹Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation, e-mail: akalabin@yandex.ru

²Immanuel Kant Baltic Federal University,
14A, Nevsky str., Kaliningrad, 236041, Russian Federation, e-mail: mishklgpmi@mail.ru

The description of the process of creating a mathematical model of vibration-force alignment when packaging chilled semi-finished products in food production is given. The model is based on alignment work on objects that are substantially smaller than the box they are in. At the same time, the model has a number of important changes. For its construction, two auxiliary problems are considered, leading the reader to the question of the conditions for the start of the movement of the aligned objects: the necessary acceleration and the vibrational nature of the movement. The initial data for the calculations are given, which were obtained by

analyzing the production line for leveling chilled semi-finished products. Part of the initial data was obtained from the drawings of the robotic arm, which is the basis of the semi-finished product alignment system. Calculations of the required pressing force on semi-finished products, vibration frequency, and movement of semi-finished products have been carried out. As a result of the experiments, it was found that the constructed mathematical model for the alignment of semi-finished products is satisfactorily adequate. The created mathematical model made it possible to improve the characteristics of the robotic arm and calculate the effective parameters of the automation system for leveling chilled semi-finished products.

Keywords: vibration impact, packaging of semi-finished products, food production, mathematical modeling, robotics, automatic control systems.

Поступила в редакцию/received: 24.10.2022; после рецензирования/ revised: 11.11.2022;
принята/accepted: 24.11.2022

УДК 004.853

АКТУАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗДРАВООХРАНЕНИИ *

Р.Н. ЧИРКОВ, д-р мед. наук, О.Н. БАХАРЕВА, канд. мед. наук,
Н.П. ЛОПИНА, канд. хим. наук, Г.Е. БОРДИНА, канд. биол. наук,
Г.С. ПАРШИН, студент

Тверской государственной медицинской университет,
170100, Тверь, ул. Советская, 4, e-mail: nadezhda_lopina@mail.ru

© Чирков Р.Н., Бахарева О.Н., Лопина Н.П.,
Бордина Г.Е., Паршин Г.С., 2023

Статья посвящена анализу наиболее важных для повышения качества медицины и уровня здравоохранения направлений применения машинного обучения – одной из технологий искусственного интеллекта. Отмечается, что машинное обучение особенно эффективно при решении определенного ряда отраслевых задач (от разработки лекарств до прогнозирования заболеваний человека), выявленного в ходе исследования. В качестве критерия экспертного анализа информации о применении машинного обучения использовано мнение специалистов о достигнутом положительном эффекте. Делается вывод, что главная особенность реализации данной технологии в медицине в настоящее время связана с рисками точного прогнозирования результатов применения искусственного интеллекта.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, медицина, здравоохранение.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-1-70-79

ВВЕДЕНИЕ

* Материалы были представлены на научном семинаре «Золотовские чтения», посвященном 100-летию со дня рождения выдающегося российского математика, академика АН СССР Золотова Евгения Васильевича (6–7 октября 2022, Тверь, Тверской государственной технической университет).

В отечественной концепции развития искусственного интеллекта (ИИ) одним из главных направлений повышения качества и уровня здравоохранения названо использование технологий ИИ в медицине [1]. Под ИИ (англ. Artificial Intelligence) в данном документе понимается комплекс технологических решений, позволяющих имитировать когнитивные функции человека и получать при выполнении конкретных задач результаты, сопоставимые как минимум с результатами интеллектуальной деятельности человека. Комплекс технологических решений включает в себя информационно-коммуникационную инфраструктуру, программное обеспечение (в том числе то, в котором задействованы методы машинного обучения), процессы и сервисы по обработке данных и поиску решений.

Построение моделей систем машинного обучения в настоящее время является одной из самых популярных и современных областей человеческой деятельности, формирующейся на стыке информационных технологий, математического анализа и статистики. Вместе с тем машинное обучение характеризуется рядом особенностей. Во-первых, для поиска вычислительной системой непредвзятого решения требуется ввести репрезентативный, релевантный и размеченный корректно набор данных. Во-вторых, алгоритмы вычислений, например в нейронных сетях, крайне сложны для интерпретации, следовательно, результаты работы указанных сетей могут быть подвергнуты сомнению и отменены человеком. Это особенно принципиально в медицине, так как принимаемые в этой сфере решения связаны с риском для здоровья и жизни человека, реализация их может породить ряд новых этических и юридических вопросов. Отсутствие понимания того, как ИИ достигает результатов, является одной из причин низкого уровня доверия к современным технологиям ИИ и может стать препятствием для их развития. На основании изложенного актуальность предложенной темы работы, заключающейся в анализе основных направлений применения машинного обучения в здравоохранении, не вызывает сомнений.

Цель работы – выявление актуальных направлений применения машинного обучения для повышения качества предоставления услуг в сфере медицины и здравоохранения. Цель достигается за счет анализа опубликованных источников, в которых рассматривается эффект от использования машинного обучения в классической медицине (она включает в себя различные методы, разработанные для поддержания и восстановления здоровья благодаря профилактике и лечению заболеваний).

Объект исследования – виды машинного обучения как инструмента, применяемого в различных областях медицины, а предмет – метод машинного обучения в указанной сфере.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Единого, общего определения машинного обучения на данный момент не существует. Например, Т. Митчелл, американский ученый, профессор Университета Карнеги – Меллона, основатель первой в мире кафедры машинного обучения и автор первого учебника по этому предмету, пишет, что «машинное обучение – это учение о компьютерных алгоритмах, которые улучшаются автоматически с помощью опыта» [2, 3]. В корпорации Google трактуют машинное обучение как «процесс, в ходе которого система обрабатывает большое число примеров, выявляет закономерности и использует их, чтобы прогнозировать характеристики новых данных» [4]. Технологические решения, разработанные с использованием методов машинного обучения, являются примером ИИ, способного решать только узкоспециализированные задачи (так называемого слабого (Weak AI) ИИ). Создание универсального, сильного

(Strong AI) ИИ, подобного человеческому, является перспективным, но сложным научно-техническим направлением.

Для достижения цели работы было предложено уточненное определение машинного обучения – одна из форм (подмножество) ИИ, заключающаяся в применении математических моделей данных, которые помогают компьютеру обучаться без непосредственных инструкций и с помощью алгоритмов выявлять закономерности в этих данных. На основе полученных закономерностей создаются модели данных для прогнозирования. Чем больше информации обрабатывает такая модель и чем дольше она используется, тем точнее становятся результаты. Описанный механизм очень похож на то, как человек оттачивает свои навыки на практике.■

Согласно документу «Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года», наиболее важными в плане повышения качества услуг в сфере здравоохранения направлениями выступают [1]:

- профилактическое обследование;
- диагностика, основанная на анализе изображений;
- прогнозирование возникновения и развития заболеваний;
- подбор оптимальных дозировок лекарственных препаратов;
- сокращение угроз пандемий;
- автоматизация и точность хирургических вмешательств.

Известно, что методы анализа информации делятся на качественные и количественные (например, статистических исследований). Исходя из особенностей рассматриваемой информации в области использования машинного обучения в медицине, ее полноты и достоверности, в качестве метода анализа выбран метод экспертных оценок, включающий учет и оценку различных мнений экспертов по результатам опубликованных данных [5]. Критерием экспертного анализа информации о применении машинного обучения принято мнение специалистов о достигнутом положительном эффекте.

Глубина поиска информации составляла не менее 20 лет для печатных и электронных данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ известных публикаций показал, что машинное обучение в настоящее время эффективно применяется для решения ряда специфических задач медицины, таких как разработка и поиск новых лекарств; помощь в постановке диагноза; прогнозирование развития различных заболеваний; помощь в лучевой диагностике и в проведении операций; персонализация лечения; прогнозирование заболеваемости и смертности в регионе; снижение издержек медицинских организаций в медицинской реабилитации, а также в осуществлении удаленного контроля параметров здоровья и др. [6–16].

Машинное обучение все глубже проникает в различные сферы жизни и отрасли экономики посредством пользовательских и бизнес-продуктов, созданных с помощью методов ИИ. Так, робот-хирург da Vinci (рис. 1), применяемый в том числе и в России, может помочь хирургу-человеку в проведении операции: напомнить план операции, стабилизировать движения рук, увеличить цветокоррекцию операционного поля. Робот не позволяет специалисту проводить заведомо неверные манипуляции [6].

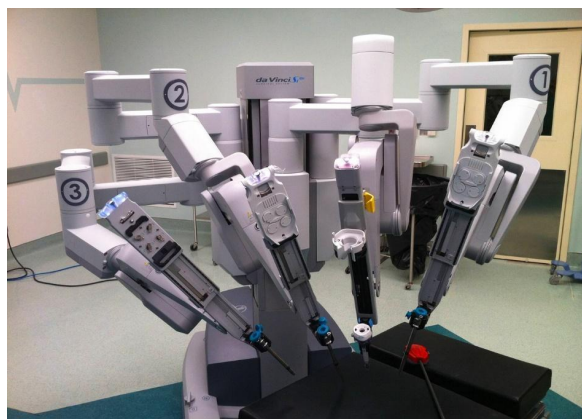


Рис. 1. Внешний вид робота-хирурга da Vinci

Благодаря адаптивному характеру машинного обучения оно наиболее эффективно для сценариев, в которых данные постоянно изменяются, свойства запросов или задач нестабильны. Такое обучение помогает, когда написать код для решения задачи фактически невозможно.

Наибольшее распространение на практике получил метод машинного обучения, основанный на использовании нейронных сетей – математических моделей, построенных по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей. Преимущество указанных сетей состоит в том, что они не программируются в привычном смысле этого слова, а обучаются.

Персонализация лечения. Одним из направлений машинного обучения является персонализация лечения, которая заключается в реализации диагностических тестов для выявления специфических биологических (генетических, молекулярных) маркеров, помогающих врачу выбрать оптимальную терапию для данного конкретного пациента. Существует множество приложений, способных при помощи методов машинного обучения подбирать наилучшее лечение для пациента.

DeepSinergy – одно из таких приложений; оно было разработано Кристиной Пройер с коллегами. Это приложение предсказывает синергетические комбинации лекарств для лечения онкологических заболеваний за счет изучения химических свойств лекарств и профилей экспрессии генов определенных линий раковых клеток, то есть, исходя из данных о конкретном пациенте и доступных для использования лекарствах, подбирает наилучшее сочетание дозировок нескольких противоопухолевых препаратов (рис. 2) [7].

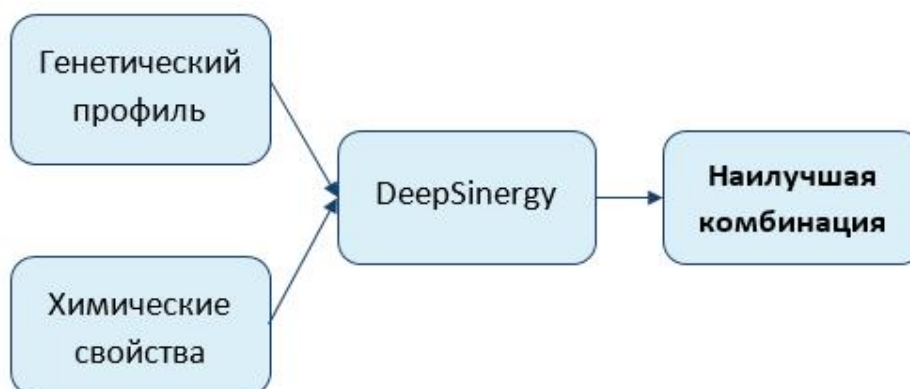


Рис. 2. Метод машинного обучения, позволяющий персонализировать лечение

Поиск лекарств. Другим направлением машинного обучения является поиск лекарств (англ. Drug Discovery, Drug Design). Процесс поиска новых лекарственных средств часто основывается на знаниях о биологической мишени (целевом белке, с которым должно взаимодействовать лекарственное вещество). Суть данного подхода можно описать так: программа, использующая методы машинного обучения, генерирует различные молекулярные структуры в формате SMILES-строки, то есть в буквенно-цифровом виде (это делает модуль-генератор), а потом проверяет, действительно ли их можно считать лекарством и насколько сложно их синтезировать (это делает модуль-дискриминатор, который пытается отличить сгенерированную SMILES от такой, которая может существовать в реальном мире). Дискриминатор обычно устанавливает схожесть с лекарственными средствами (по набору физических свойств, таких как растворимость, гидрофильность, липофильность) и синтезируемость молекулы с данной SMILES-строкой (по валентностям атомов, кратности связей, заряду молекулы и др.) (рис. 3) [8]. Отметим, что именно с помощью этой методики исследователи из Массачусетского технологического института в 2019 г. открыли самый сильный на данный момент антибиотик – халицин [9].



Рис. 3. Метод машинного обучения при разработке лекарств

Во время поиска и разработки новых лекарственных средств часто прибегают к помощи машинного обучения в таких задачах, как предсказание молекулярных свойств потенциальной молекулы лекарства, формы какого-либо белка, активности взаимодействия между веществами [8].

Для кодирования молекулярной структуры существует специальная нотация SMILES – система правил для однозначного описания состава и структуры молекулы химического вещества в буквенно-цифровом виде. Для генерации молекулярных структур используют генеративные состязательные сети [10].

Снижение издержек медицинских организаций. Следующим направлением машинного обучения в здравоохранении является снижение издержек медицинских организаций. Так, чат-боты и голосовые ассистенты уже сегодня могут записать человека на прием к врачу в некоторых клиниках Тверского региона. Это снижает потребность клиник в медицинских регистраторах и позволяет высвободить средства на удовлетворение иных потребностей медицинской организации. Такая система, как IBM Watson, может, помимо всего прочего, следить за наличием остатков расходных материалов и лекарств. Схема использования метода машинного обучения в снижении издержек медицинских организаций показана на рис. 4. Одновременно, как видно на схеме, прогнозируется потребность клиники в лекарствах на месяцы вперед, что не дает организации покупать больше, чем нужно. За счет этого также уменьшаются издержки.



Рис. 4. Метод машинного обучения для снижения издержек медицинских организаций

Лучевая диагностика. Машинное обучение все чаще применяют для решения задач лучевой диагностики. Программа создает изображение в ходе рентгенологического или ультразвукового исследования пациента в виде компьютерного кода и по нему прогнозирует наличие патологии. Если требуется, программа делает ее локализацию [9]. Российская программа Diagnocat – хороший пример подобной модели. Указанная программа анализирует дентальные рентгеновские снимки, отмечает на них вероятные болезни челюстно-лицевой области, например периодонтит (рис. 5). После внедрения данной программы в московских клиниках «Дентал Фэнтези» и Belgravia Dental Studio (которые посетили, согласно данным за 2019–2020 гг., более 20 000 человек) в среднем у пациентов было обнаружено на 30 % больше патологий челюстно-лицевой области по сравнению с теми, кто не был проанализирован данной программой [12–14]. Кроме того, отмечается высокая эффективность в визуализации структуры молочной железы. Автоматизированная система ИИ осуществляет оценку плотности груди для стратификации риска [15].

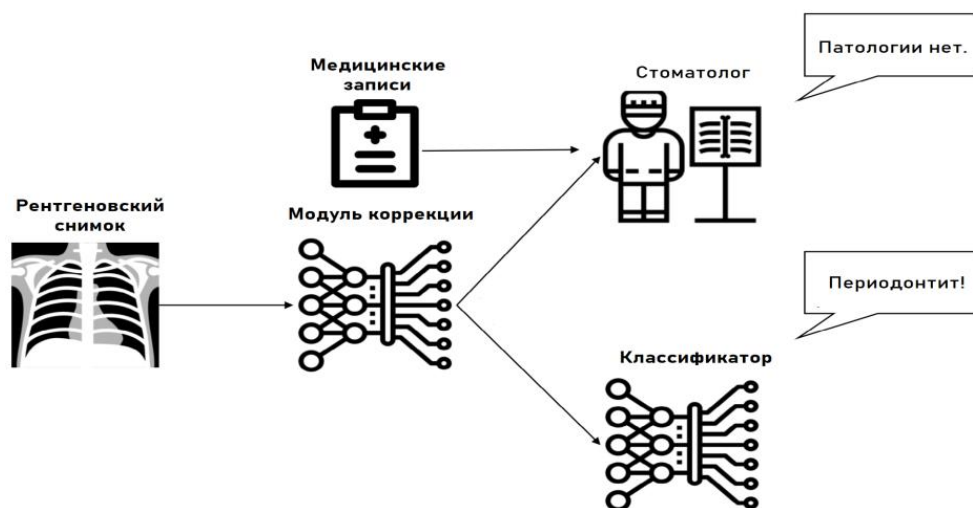


Рис. 5. Метод машинного обучения для решения задач лучевой диагностики

Сокращение угроз пандемий. Группой исследователей из Карелии при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ была создана для прогнозирования пандемии модель краткосрочного прогнозирования числа зараженных и умерших от COVID-19 на период до 14 дней. Оценка ее точности с учетом ошибки предсказания составляет от 2,3 до 24 % для 85 регионов России. При этом модель показывает меньшую ошибку для регионов с большой численностью

населения. Она может быть использована не только для предсказания пандемии названной выше коронавирусной инфекции, но и для контроля и оценки распространения новых инфекционных заболеваний на этапе их возникновения, пике заболеваемости и в период стабилизации [16].

Кроме того, в Тверском регионе на базе ФГБОУ ВО «Тверской ГМУ» апробирован алгоритм дистанционного мониторинга различных проявлений постковидного синдрома. При помощи технологии ИИ формируются модели пациентов разных клинических направлений (кардиологии, неврологии, эндокринологии и др.) с организацией динамического мониторинга их состояния.

Экспертные оценки и практика применения машинного обучения показывают, что технология, кроме полезных функций в сфере здравоохранения, обладает рядом недостатков, причины возникновения которых требуют специального исследования и достаточной статистики испытаний. В отдельных случаях такая технология способна создавать реальные угрозы жизни и здоровью человека (например, при ее криминальном использовании): технически реально создать с помощью машинного обучения вещества или патогены, являющиеся опасными для одной этнической группы и относительно безопасными для другой, поскольку определенным этносам присущи генетически детерминированные признаки (отсутствие какого-либо фермента и т. д.), не характерные для прочих народов. Как сообщил начальник войск радиационной, химической и биологической защиты Вооруженных Сил России И. Кириллов, «американские биологические лаборатории на Украине могли использоваться для создания биоагентов, способных избирательно поражать этнические группы», что подтверждает реальность описанной угрозы [17].

К недостаткам метода машинного обучения медицине, судя по результатам анализа опубликованных в литературе данных [6–16], можно отнести следующие. Во-первых, необходимость предварительной специальной обработки исходных данных для применения технологии машинного обучения в медицине и трудности анализа полученных результатов. Так, сведения в медицинских картах часто являются неполными и написаны не по единому стандарту. Запись во многих случаях связана с привычками конкретного врача. Кроме этого, необходимо учесть тот факт, что врач при принятии решений часто анализирует в комплексе различные типы информации (графическую со снимков, аудиальную с фонендоскопа, цифровую с анализов и т. п.) и синтезирует новую клиническую информацию – диагноз, прогноз, план лечения и т. д. Отдельная обученная модель неспособна обрабатывать комплексную информацию. Для этого ее нужно интегрировать с другими моделями, что не является тривиальной задачей. В настоящее время невозможно также четко понять логику принятия решений многими программами (то есть с точки зрения человека), так как они «мыслят» не как люди, а всего лишь находят математические закономерности в исходных данных. Во-вторых, при реализации технологии машинного обучения возникают проблемы пере- и недообучения. Поэтому специалисты вынуждены подбирать необходимое количество итераций обучения машины эмпирическим путем. Отсутствие единых стандартов в сфере машинного обучения обуславливает факт низкой воспроизводимости медицинских исследований. Так, в одной и той же модели из-за отличий в форматах сохранения рентгеновских снимков (сделанных на аналогичных аппаратах разных производителей) может снизиться эффективность их анализа. В то же время для врача-рентгенолога это не является проблемой. В-третьих, возможно возникновение проблем этического характера. Нивелируются ценность и роль врача как профессионала. Становится неясным, кто несет ответственность за ошибки в лечении и диагностике при использовании методов машинного обучения. К недостаткам применения

машинного обучения в медицине, по мнению врачей, можно отнести снижение качества межличностного контакта «врач – пациент». Такая ситуация может уменьшить комфорт лечения для пациента. По сути, происходит дегуманизация лечения человека: больной низводится до набора цифр и графиков [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований и поставленной цели получены основные результаты анализа актуальных направлений применения машинного обучения для повышения качества предоставления услуг в сфере медицины и здравоохранения.

Наиболее динамично при помощи методов машинного обучения развивается ряд направлений в здравоохранении, обладающий высоким практическим эффектом:

персонализация лечения, позволяющая предсказывать синергетические комбинации лекарств для лечения онкологических заболеваний, способствующая изучению химических свойств лекарств и профилей экспрессии генов определенных линий канцероцитов;

поиск новых лекарственных средств на основе знаний о биологической мишени – целевом белке, с которым должно взаимодействовать лекарственное вещество;

снижение издержек медицинских организаций за счет автоматического непрерывного мониторинга расходования лекарственных веществ и прогнозирования потребностей лечебного учреждения в новых на заданный период времени;

лучевая диагностика с применением в комплексе технологий компьютерного зрения и машинного обучения, что позволяет диагностировать более чем на 30 % больше патологий по сравнению с традиционным подходом;

создание нейросетевых моделей развития массовых инфекционных заболеваний для сокращения угроз пандемий. Оценка ее точности с учетом ошибки предсказания составляет от 2,3 до 24 % для 85 регионов России. Практика применения модели показывает, что она может быть использована не только для предсказания пандемии, вызванной коронавирусной инфекцией, но и для контроля и оценки распространения новых инфекционных заболеваний на этапе их возникновения, пике заболеваемости и в период стабилизации.

Метод машинного обучения в сфере здравоохранения имеет ряд недостатков, связанных прежде всего с низкой адаптацией к неавтоматизированной части медицины и пока малым опытом, статистикой практического использования. Так, возможно возникновение целого ряда этических и юридических вопросов, ответы на которые еще предстоит найти. Отсутствие единых стандартов в сфере машинного обучения порождает низкую повторяемость результатов медицинских исследований. Минимизируется межличностный контакт между врачом и пациентом, как следствие, возникает дегуманизация личности пациента (представление его в виде набора цифр и графиков). Есть вероятность криминального использования машинного обучения в медицине для синтеза опасных патогенов.

В рамках одной статьи не представляется возможным охватить все аспекты использования ИИ в здравоохранении. В дальнейших исследованиях целесообразно рассмотреть другие технологии (например, компьютерное зрение), а также особенности преподавания темы ИИ в медицинском вузе, анализ практики внедрения данной перспективной технологии в систему здравоохранения Тверского региона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года: Указ Президента Рос. Федерации от 10.10.2019 № 490 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sudact.ru/law/ukaz-prezidenta-rf-ot-10102019-n-490/natsionalnaia-strategiia-razvitiia-iskusstvennogo-intellekta/> (дата обращения: 20.06.2022).
2. Mitchell T. *Machine Learning*, McGraw Hill. 1997. 432 p.
3. Sarker I.H. *Machine learning: Algorithms, real-world applications and research directions // SN Computer Science*. 2021. V. 2. № 3. P. 1–21.
4. Аль-Шукри С. Х., Мосоян М.С., Семенов Д.Ю., Ильин Д.М. Опыт 424 робот-ассистированных вмешательств в Санкт-Петербурге: радикальная простатэктомия, резекция почки и нефрэктомия // *Вестник хирургии имени И.И. Грекова*. 2016. Т. 175. № 5. С. 74–77.
5. Preuer K., Lewis R.P., Hochreiter S., Bender A., Bulusu K.C., Klambauer G. DeepSynergy: Predicting Anti-cancer Drug Synergy with Deep Learning // *Bioinformatics*. 2018. V. 34. № 9. P. 1538–1546.
6. Bagchi A. Latest Trends in Structure-based Drug Design with Protein Targets // *Advances in Protein Chemistry and Structural Biology*. 2020. V. 121. P. 1–23.
7. Hirohara M., Saito Y., Koda Y., Sato K., Sakakibara Y. Convolutional Neural Network Based on SMILES Representation of Compounds for Detecting Chemical Motif // *BMC bioinformatics*. 2018. V. 19. № 19. P. 83–94.
8. Stokes J.M., Yang K., Swanson K., Jin W., Cubillos-Ruiz A., Donghia N.M., Collins J.J. A Deep Learning Approach to Antibiotic Discovery // *Cell*. 2020. V. 180. № 4. P. 688–702.
9. Dilmegani C. Top 6 Use Cases & Examples of Chatbots in Healthcare. URL: <https://research.aimultiple.com/chatbot-healthcare/> (дата обращения: 20.06.2022).
10. Ghassemi M., Naumann T., Schulam P., Beam A.L., Chen I.Y., Ranganath R.A. Review of Challenges and Opportunities in Machine Learning for Health // *AMIA Summits on Translational Science Proceedings*. 2020. V. 2020. P. 191.
11. Nichols J.A., Herbert Chan H.W., Baker M.A.B. Machine Learning: Applications of Artificial Intelligence to Imaging and Diagnosis // *Biophysical reviews*. 2019. V. 11. № 1. P. 111–118.
12. Diagnocat – виртуальный помощник стоматолога для планирования лечения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://diagnocat.ru/> (дата обращения: 20.06.2022).
13. Гаврилов Д.В., Абрамов Р.В., Кирилкина А.В., Ившин А.А., Новицкий Р.Э. Модель прогнозирования пандемии COVID-19 на основе машинного обучения в отдельных регионах Российской Федерации // *Фармакоэкономика. Современная фармакоэкономика и фармакоэпидемиология*. 2021. Т. 14. № 3. С. 342–356.
14. Arieno A., Chan A., Destounis S.V. A Review of the Role of Augmented Intelligence in Breast Imaging: From Automated Breast Density Assessment to Risk Stratification // *American Journal of Roentgenology*. 2019. V. 212. № 2. P. 259–270.
15. Выродова Ю. Минобороны допустило разработку в США биоагентов против этнических групп. URL: <https://www.rbc.ru/politics/10/03/2022/6229fbb79a79476fc45f58ad> (дата обращения: 20.06.2022).
16. Знакомство с машинным обучением [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.google.ru/about/main/machine-learning-qa/> (дата обращения: 20.06.2022).

Для цитирования: Чирков Р.Н., Бахарева О.Н., Лопина Н.П., Бордина Г.Е., Паршин Г.С. Актуальные направления применения машинного обучения в здравоохранении // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 1 (17). С. 70–79.

CURRENT AREAS OF APPLICATION OF MACHINE LEARNING IN HEALTH CARE

R.N. CHIRKOV, Dr. Sc., O.N. BACHAREVA, Cand. Sc., N.P. LOPINA, Cand. Sc.,
G.E. BORDINA, Cand. Sc., G.S. PARSHIN, Stud.

Tver State Medical University,
4, Sovetskaya str., Tver, 170100, Russian Federation, e-mail: nadezhda_lopina@mail.ru

This work is devoted to the analysis of the most important areas for improving the quality of medicine and the level of health care of the areas of application of so-called machine learning. In the healthcare industry, machine learning is actively used to solve a number of industry problems, from drug development to predicting human diseases. It should be noted the main feature of the implementation of this technology in medicine, associated with a wide range of possible practical applications.

Keywords: machine learning, medicine, healthcare.

Поступила в редакцию/received: 05.07.2022; после рецензирования/revised: 14.09.2022;
принята/accepted: 24.10.2022

УДК 004.94

О МОДЕЛИРОВАНИИ ПЕРЕХОДНЫХ СОСТОЯНИЙ ОРГАНИЗМА*

Б.А. КОБРИНСКИЙ, д-р мед. наук

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН,
119333, Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2, e-mail: kba_05@mail.ru

© Кобринский Б.А., 2023

Целью построения динамической математической модели является анализ во времени переходных патологических состояний организма и оценка эффективности протекторных воздействий профилактического характера. Квазиконтинуум переходных состояний организма рассматривается как случайный процесс с дискретными состояниями. Скачкообразные, качественные изменения здоровья сопоставимы с процессом с фазовыми переходами. Эволюция системы заключается в переходе от нормы к патологии, за исключением случаев, когда под воздействием протекторов возможен регресс патологического процесса. Создание модели переходных состояний здоровья – цифрового двойника человека – отвечает цели управления персональным здоровьем путем предупреждения или отсроченного проявления болезней на базе направленных контрвоздействий на определенные модифицируемые факторы риска развития патологических процессов.

Ключевые слова: квазиконтинуум переходных состояний здоровья, теория случайных процессов, фазовое пространство, предикторы, протекторы.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-1-79-86

* Материалы были представлены на научном семинаре «Золотовские чтения», посвященном 100-летию со дня рождения выдающегося российского математика, академика АН СССР Золотова Евгения Васильевича (6–7 октября 2022, Тверь, Тверской государственный технический университет).

ВВЕДЕНИЕ

Организм как адаптивная динамическая система [1] обладает на многих уровнях свойством устойчивости (сохранения стабильного состояния в определенных пределах) к входным негативным воздействиям. Однако для нормального развития и существования организму необходимы определенные условия, нарушение которых может приводить к трансформации его строения, функций, свойств [2]. Изменение соответствующих условий способно породить необратимые патологические сдвиги.

Переходы между многими состояниями вещества происходят в результате микроскопических взаимодействий с участием огромного (приблизительно 10^{23}) числа частиц, из которых состоит вещество, и приводят к драматическим изменениям его макроскопических свойств [3]. Между здоровьем и болезнью существует бесконечное число промежуточных ступеней, что становится ясно, если рассматривать происходящие в организме трансформации на молекулярном уровне. Пространственно-временная модель пре- и постнатального периодов развития и состояния здоровья с выделением моментов, во время которых оно изменялось, дает возможность интегративно оценить давление факторов среды при различной предрасположенности и резистентности к заболеваниям. С учетом различных трактовок понятия адаптации, существующих в традиционной и космической медицине, можно выделить ряд уровней гомеостатики организма:

состояние физиологической нормы (минимальное напряжение регуляторных систем);

донозологические состояния (напряжение регуляторных систем со снижением адаптации к нагрузкам);

преморбидные состояния (включение дополнительных компенсаторных механизмов при неудовлетворительной адаптации к условиям окружающей среды);

срыв (полом) адаптационных механизмов (патологические изменения на органно-системном уровне) [4, 5].

Предикторами (факторами риска), реализующими наследственную предрасположенность к хроническим болезням, по своей природе мультифакторных, то есть проявляющихся при сочетании наследственной и средовой компонент, могут быть образ жизни (низкая двигательная активность, несбалансированное питание, избыточная нагрузка на работе и др.); факторы микро- и макросреды обитания; накопление вредных веществ в организме человека и сопутствующие заболевания. Предикторы – это случайные факторы, воздействующие на ход процесса. Изменение, ослабление или усиление негативных эффектов во времени определяет необходимость периодической переоценки их соотносительной роли, динамический репрогноз риска хронических заболеваний.

Е.В. Золотов и И.П. Кузнецов [6] обращали внимание, что любая предметная область является открытой, то есть в ней постоянно возникают новые факты. Соответственно, в системе, как указывают авторы, возможны реакции, вызванные появлением непредусмотренных или недопустимых случаев, в том числе обусловленных неполнотой знаний, под которыми в данном случае понимаются некоторые доступные системе в текущий момент факты. Подобные ситуации случаются в организме человека в течение жизни.

Переход одних состояний в другие, развитие патологических изменений, течение которых заранее предсказать точно невозможно, наблюдаются при нарушении хода нормального развития организма, то есть имеет место случайный процесс с дискретными состояниями. Актуальным является создание цифрового двойника динамического процесса изменений в организме человека, который позволит

прогнозировать нежелательное течение хронического патологического процесса и оценивать эффективность корректирующих воздействий. В отличие от многочисленных моделей для отдельных патологических процессов, многочисленные примеры которых представлены в [7], новая модель должна быть ориентирована на анализ нечетко представленных донозологических ситуаций.

Цель исследования – формирование требований к построению математической модели континуума переходных состояний организма на основе оценки случайных процессов.

КОНТИНУУМ ПЕРЕХОДНЫХ СОСТОЯНИЙ ОРГАНИЗМА

Концепция континуума (фактически квазиконтинуума) переходных состояний, определяющих и состояние здоровья, и возникновение болезни, свидетельствует об отсутствии четких границ как между нормой и патологией, так и между отдельными заболеваниями. В настоящее время описаны, наряду с общепатологической концепцией континуума [8, 9], варианты специфических континуумов для различных классов патологии и для различных трудноразличимых по тяжести состояний, характеризующих разные клинические формы заболеваний [10–13]. Изменения, возникающие на молекулярном уровне, могут приводить к развитию хронических заболеваний. Несмотря на сложность обнаружения моментов нарушения нормального течения биохимических/иммунологических процессов (и, соответственно, появления патологий), в изучаемой континуальности имеют место критические точки (условно можно говорить о точках перегиба), обнаружение которых необходимо для своевременного выявления начальных проявлений хронического заболевания. В концепции континуума переходных состояний организма представлена последовательность сменяющих друг друга в течение жизни потенциально возможных и клинически характеризуемых состояний: норма (норма реакции) – функциональные отклонения – пограничные (предболезненные) состояния – хронические заболевания – стойкие нарушения функций и/или анатомических структур организма, приводящие к инвалидности (рис. 1).

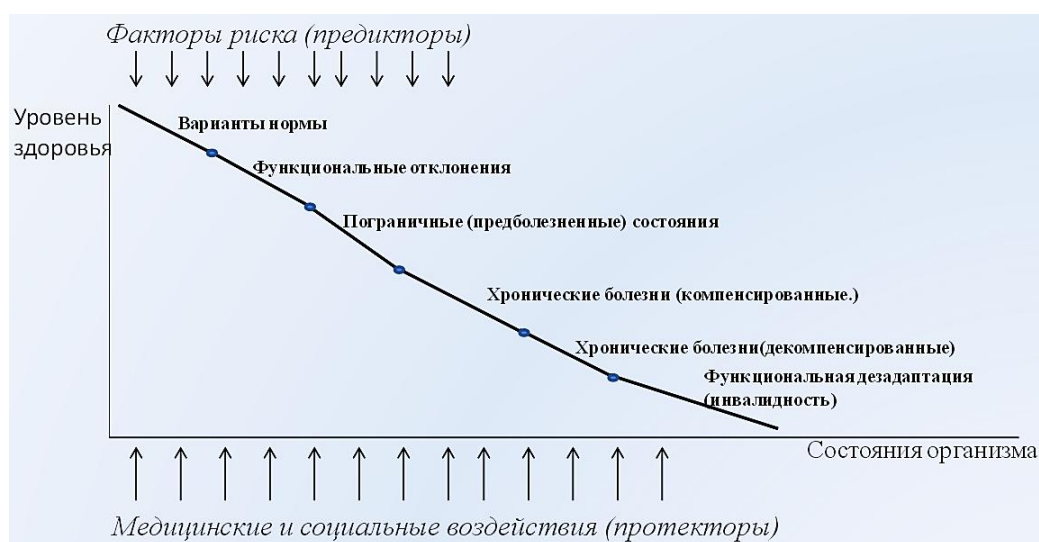


Рис. 1. Кривая континуума переходных состояний организма с точками перегиба, характеризующими изменение состояния

Цепочка переходных состояний, как указано выше, обусловлена наследственной предрасположенностью и воздействующими в течение жизни разнотипными

факторами риска (предикторами болезней). С точки зрения здоровьесбережения существует необходимость динамического анализа переходных состояний организма на донозологическом этапе формирования хронических неинфекционных заболеваний и оценки эффективности управляющих профилактических воздействий (контрмер) в рамках рекомендательных и профилактических систем [14, 15]. Риск заболевания обуславливается, как правило, комплексным воздействием ряда факторов. Но каждая ситуация вызывается определенными факторами риска в их темпоральной (временной) динамике.

Наследственное (генетическое) предрасположение к болезни, варьирующее в определенных пределах, – это немодифицируемый параметр, или константа. В то же время сейчас многие немодифицируемые факторы являются модифицируемыми, то есть управляемыми.

Для оценки и ранжирования факторов риска необходимо использовать коэффициенты, или факторы уверенности, позволяющие уточнить уровень риска с учетом времени манифестации и степени выраженности признака [16]. Это особенно важно для нечетких субъективно-объективных характеристик состояния здоровья, связанных с оценкой жалоб и данных врачебного осмотра. При анализе временной шкалы изменений, вызванных динамикой патологических проявлений, существенное значение имеют понятия нечеткости, гранулярности и гранулярной кластеризации [17, 18]. Это определяется тем, что гранулы, отличающиеся по своей природе, сложности и размеру, рассматриваются как совокупность практически неразличимых объектов, обусловленных типом и количеством. Следовательно, уровень обобщенности и детализации гранул (по Заде) может служить формальной характеристикой различных изменений в организме, которые можно оценивать с позиции когнитивных измерений [19–21].

КОНТИНУАЛЬНАЯ КРИВАЯ И ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

Смена состояний организма (норма – донозологические или предболезненные отклонения – возникновение и развитие заболеваний) в определенной степени сопоставима с фазовыми переходами, возникающими при изменении внешних условий. В этом случае фазовая траектория отображает изменение состояния здоровья во времени, точки перехода из одного фазового состояния в другое характеризуют качественное изменение состояния организма (фазовые точки представляют состояние системы), а переходные состояния предстают как квазиконтинуум со скачкообразными изменениями.

Точка описывает состояние всей системы в целом в фиксированный момент времени. Изменение системы с течением времени соответствует движению точки в фазовом пространстве состояний здоровья. Качество единичного или интегрального фактора определяет уровень риска болезни, возникающего при воздействии этого фактора.

Организм как объект (и в то же время система) под влиянием различных факторов переходит из одного состояния в другое. Переходы могут осуществляться в пределах так называемой нормы реакции, или диапазона модификационной изменчивости, возникающей в ответ на преобразование условий окружающей среды. В этом случае отсутствует необходимость коррекции происходящих в системе изменений. Но дальнейшие отклонения на биохимическом или функциональном уровне могут вызвать развитие предпатологического или патологического процесса. Если это происходит, то необходимы прогнозирование течения возникшего (нежелательного) процесса и оценка возможностей возвращения к предыдущему состоянию или приостановка дальнейшего развертывания негативного сценария. Следовательно, математическая модель поведения

системы должна включать управляющие воздействия на модифицируемые факторы риска.

В то же время следует учитывать, что в системе организма, наряду с непрерывно происходящими малозаметными или аутокорректируемыми изменениями, имеют место скачкообразные переходы первого рода, близкие к так называемой критической точке. Она представляет собой точку на фазовой плоскости, в которой оканчивается кривая фазового равновесия, или же точку, в которой кривая фазовых переходов непрерывного типа превращается в кривую фазовых переходов первого рода. Переходы первого рода, близкие к критической точке, становятся весьма похожими на непрерывные, что определяет физическую общность между непрерывными фазовыми переходами и критическими явлениями. В рассматриваемой модели переходные процессы, имеющие место при хронической ишемии мозга (конечный их результат – инсульт), демонстрируют общность фазовых переходов и критического явления.

Эволюция системы в течение жизни обусловлена постоянно происходящим перемещением точки от нормы к патологии, за исключением тех случаев, когда с помощью протекторов (контрфакторов) удастся добиться регресса патологического процесса, то есть приостановки процесса (реализации негативного сценария) или даже некоторого возвратного движения по кривой континуума. Для отражения этого математическая модель системы должна включать управляющие воздействия на модифицируемые факторы риска, количественно оцененная мера доверия к которым указывает на их потенциально возможный эффект. В отношении метастабильного состояния как состояния неустойчивого равновесия, например медикаментозно контролируемого повышенного артериального давления, модель должна обеспечивать динамический контроль за возвращением в субнормальное состояние или переходом в крайне нестабильное состояние (гипертонический криз). Траектория системы в фазовом пространстве определяется различным исходным, или пренатальным (до рождения), уровнем здоровья (рис. 2).

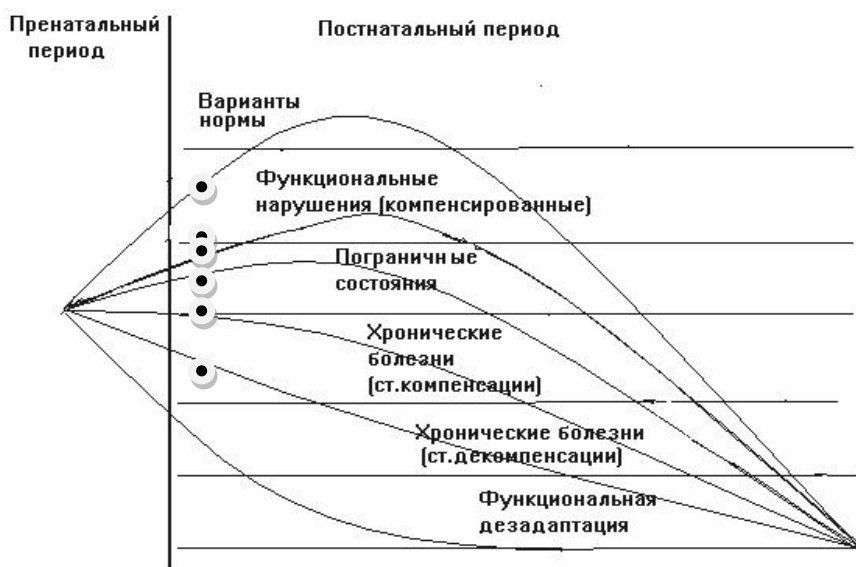


Рис. 2. Кривые переходных состояний здоровья в зависимости от исходных значений (уровней)

Переход в то или иное состояние зависит от мощности оказанного воздействия, которое определяется количеством и качеством негативных эффектов. Например,

пусковым фактором для гипертонического криза, одним из следствий которого является инфаркт или инсульт, может послужить стрессовая ситуация, запускающая цепочку состояний. Приведенный пример относится к переходному процессу хронической ишемии мозга – длительного процесса, который может завершиться инсультом, что демонстрирует общность фазовых переходов и неустойчивости, приводящей к критическим ситуациям (как в физике критических явлений [22]).

МОДЕЛЬ ПЕРЕХОДНЫХ СОСТОЯНИЙ ОРГАНИЗМА – ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ИНДИВИДУУМА

Процесс последовательного перехода одних состояний в другие, течение которого точно спрогнозировать невозможно, наблюдается при различной патологии, то есть это случайный процесс с дискретными состояниями, множество которых в любой момент времени конечно [23]. В то же время, как отмечает С.В. Емельянов [24], интерес представляет выделение ситуаций, при которых возможно получить оптимальное или субоптимальное решение задачи стабилизации, несмотря на значительную неопределенность описания объекта управления или внешних сил, что и имеет место в нашем случае.

Планирование адаптивной среды [25] предполагает прогнозирование «индивидуальных маршрутов здоровья» в отношении питания, климатических условий, микросреды обитания, лекарственных воздействий с учетом персональной предрасположенности человека. Другими словами, можно говорить о формировании здорового образа жизни в адаптивной экологической нише. Для этого необходим подбор протекторов, формируемых в модели в соответствии с расположением индивидуумов на континуальной кривой (фазовой траектории). В указанном случае протекторы, воздействующие на модифицируемые факторы риска, могут при ряде условий обеспечить возврат системы к предыдущему фазовому состоянию. Превентивные мероприятия должны быть направлены на максимально возможную реализацию резервов физиологических систем человека в рамках генотипически обусловленной нормы реакции.

Создание модели переходных состояний здоровья – цифрового двойника человека – отвечает цели управления персональным здоровьем. Динамическая оценка системы в рамках функционирования модели должна обеспечивать оптимизацию эффективности применяемых управляющих внешних воздействий.

Воздействие протекторов в качестве профилактических мероприятий должно начинаться с элементов здоровьесбережения с последующим подключением медикаментозных средств, что может отрабатываться на цифровом двойнике человека для оценки потенциальных возможностей возврата системы к предыдущему фазовому состоянию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Математическая модель поведения системы, включающая управляющие воздействия протекторов на модифицируемые факторы риска, послужит основой для прогнозирования течения патологического процесса и оценки его стабилизации. Встроенная в интеллектуальную рекомендующую систему она позволит существенно повысить динамику личных прогнозов.

Создание цифрового двойника человека на основе модели переходных состояний организма, опирающейся на фазовые переходы, должно обеспечить управление персональным здоровьем человека путем целенаправленных воздействий в целях коррекции фазовых траекторий квазиконтинуума здоровья во времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тюкин И.Ю., Терехов В.А. Адаптация в нелинейных динамических системах. М.: ЛКИ. 2008. 384 с.
2. Шмальгаузен И.И. Вопросы дарвинизма: неопубликованные работы. М.: Наука. 1990. 158 с.
3. Fleury P.A. Phase Transitions, Critical Phenomena and Instabilities // *Science*. 1981. V. 211. № 4478. P. 125–131.
4. Grigoriev A.I., Baevsky R.M. Problem of Health Evaluation and Conception of Norm in Pace Medicine. Moscow: Slovo. 2006. 192 p.
5. Баевский Р.М., Берсенева А.П. Введение в донологическую диагностику. М.: Слово. 2008. 176 с.
6. Кобринский Б.А. Континуум переходных состояний организма и мониторинг динамики здоровья детей. М. – Берлин: Директ-Медиа. 2016. 221 с.
7. Золотов Е.В., Кузнецов И.П. Расширяющиеся системы активного диалога. М.: Наука. 1982. 317 с.
8. Петров И.Б. Компьютерное моделирование нормальных и патологических процессов в медицинской практике // *Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*. 2009. Т. 1. № 1-2. С. 157–170.
9. Kobrinsky B.A. Concept of the Continuum of Intermediate States of Development: Risk Factors in Child Health // *Medical Audit News*. 1995. V. 5. № 2. P. 21–22.
10. Dzau V.J., Antman E.M., Black H.R., Hayes D.L., Manson J-A.E., Plutzky J., Popma J.J., Stevenson W. The Cardiovascular Disease Continuum Validated: Clinical Evidence of Improved Patient Outcomes Part I: Pathophysiology and Clinical Trial Evidence (Risk Factors Through Stable Coronary Artery Disease) // *Circulation*. 2006. V. 114. № 25. P. 2850–2870.
11. Семке В.Я., Белокрылова М.Ф. «Истерическая болезнь»: современные аспекты нозологической специфичности и психосоматических соотношений // *Психические расстройства в общей медицине*. 2006. Т. 1. № 1. С. 16–22.
12. Wraith J.E., Scarpa M., Beck M., Bodame, O.A., De Meirleir L., Guffon N., Melgaard Lund A., Malm G., der Ploeg Ans T. Van, Zeman J. Mucopolysaccharidosis Type II (Hunter Syndrome): a Clinical Review and Recommendations for Treatment in the Era of Enzyme Replacement Therapy // *European Journal of Pediatrics*. 2008. V. 167. № 3. P. 267–277.
13. Spergel J.M. From Atopic Dermatitis to Asthma: the Atopic March // *Annals of Allergy Asthma & Immunology*. 2010. V. 105. № 2. P. 99–106.
14. Ricci F., Rokach L., Shapira B., Kantor P. (Eds.) Recommender Systems Handbook: A Complete Guide for Research Scientists and Practitioners. New York, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer. 2011.
15. Grigoriev O.G., Kobrinskii B.A., Osipov G.S., Molodchenkov A.I., Smirnov I.V. Health Management System Knowledge Base for Formation and Support of a Preventive Measures Plan // *Procedia Computer Science*. 2018. V. 145. P. 238–241.
16. Кобринский Б.А. Триединство факторов уверенности в задачах медицинской диагностики // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2018. № 2. С. 62–72.
17. Zadeh L.A. Towards a Theory of Fuzzy Information Granulation and its Centrality in Human Reasoning and Fuzzy Logic // *Fuzzy sets systems*. 1997. V. 90. Iss. 2. P. 111–127.
18. Ding S., Du M., Zhu H. Survey on Granularity Clustering // *Cognitive Neurodynamics*. 2015. V. 9. № 6. P. 561–572.

19. Yao Y. The Art of Granular Computing // *International Conference on Rough Sets and Intelligent Systems Paradigms*. – Springer, Berlin, Heidelberg. 2007. P. 101–112.

20. Святкина М.Н., Тарасов В.Б. Системы приобретения знаний третьего поколения на основе когнитивных измерений. *Труды четырнадцатой национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2014: в 3 т.* Казань: РИЦ «Школа». 2014. Т. 3. С. 58–67.

21. Кобринский Б.А. О роли грануляции информации и комплексных факторов уверенности в медицинских интеллектуальных системах // *Мягкие измерения и вычисления*. 2020. № 4. С. 88–99.

22. Иванов Д.Ю. Критические явления в чистых жидкостях // *Вестник СибГУТИ*. 2009. № 3. С. 94–104.

23. Вентцель Е.С., Овчаров Л. А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: Высшая школа. 2000. 383 с.

24. Емельянов С.В. Избранные труды: в 2 т. М.: Издательство Московского университета. 2009. Т. 1. 557 с.

25. Бочков Н.П. Генетические последствия воздействия факторов окружающей среды // *Вестник Академии медицинских наук СССР*. 1981. № 3. С. 13–19.

Для цитирования: Кобринский Б.А. О моделировании переходных состояний организма // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 1 (17). С. 79–86.

ON SIMULATION OF TRANSIENT STATES OF THE ORGANISM

B.A. KOBRINSKY, Dr. Sc.

Federal Research Center «Computer Science and Control» of RAS,
44, corp. 2, Vavilova str., Moscow, 119333, Russian Federation, e-mail: kba_05@mail.ru

The purpose of constructing a mathematical model is to dynamically analyze the transitional states of the organism that threaten the formation of chronic diseases in the future and to evaluate the effectiveness of preventive protective effects. The quasi-continuum of transitional states of an organism is considered as a random process with discrete states. It is possible to compare the process with phase transitions to spasmodic qualitative changes in health. The evolution of the system consists in the transition from the norm to pathology, with the exception of cases when, under the influence of protectors, a regression of the pathological process is possible. The creation of a model of transitional states of health – a digital twin of a person – meets the goal of control personal health by preventing or delaying the manifestation of diseases based on directed counter-influences on certain modifiable risk factors for the development of pathological processes.

Keywords: transient states of health, theory of random processes, phase space, predictors, protectors.

Поступила в редакцию/received: 05.07.2022; после рецензирования/revised: 10.09.2022;
принята/accepted: 12.09.2022

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ИНТЕРЕСАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОБОРОНЫ И БЕЗОПАСНОСТИ ГОСУДАРСТВА*

Т.Ю. АЛЕХИН, д-р техн. наук

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

© Алехин Т.Ю., 2023

Статья посвящена анализу прогнозов об ожидаемом характере будущих войн и возможных направлениях применения искусственного интеллекта в системах и комплексах военного назначения в интересах обеспечения обороны и безопасности Российской Федерации.

Ключевые слова: технологии искусственного интеллекта, системы поддержки принятия решений, автономные боевые системы, логистические системы, комплексы средств автоматизации.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-1-87-91

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России и ведущих зарубежных странах как ученые, так и политики отмечают, что происходит очередной виток развития технологий искусственного интеллекта (ИИ) и внедрения их в различные отрасли экономики, промышленного производства, в том числе и оборонно-промышленного комплекса.

По оценкам специалистов, внедрение технологий искусственного интеллекта в различные системы и комплексы военного назначения позволит значительно улучшить тактико-технические характеристики этих систем и комплексов, расширить боевые и функциональные возможности вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) и существенно сократить длительность цикла управления войсками и оружием. В России утвержден документ «Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года», в котором определены цели и основные задачи его развития, а также меры, направленные на расширение его использования в научно-технической области [1].

Цель настоящей статьи – обзор основных направлений применения известных технологий ИИ в существующих и разрабатываемых образцах ВВСТ с целью обеспечения обороноспособности страны.

Новизна излагаемых в статье материалов заключается в представлении результатов анализа применительно к образцам вооружения, ВВСТ Вооруженных Сил Российской Федерации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основой для разработки представленных материалов стал анализ современных отечественных средств и систем вооружения, в которых используются технологии (элементы) ИИ. Необходимость использования технологий ИИ в оборонных целях в декабре 2020 г. отметил Президент РФ В.В. Путин во время выступления на

* Материалы были представлены на научном семинаре «Золотовские чтения», посвященном 100-летию со дня рождения выдающегося российского математика, академика АН СССР Золотова Евгения Васильевича (6–7 октября 2022, Тверь, Тверской государственный технический университет).

расширенном заседании коллегии Минобороны России: в ходе боевой учебы «следует более активно осваивать, “обкатывать” вооружения и технику с элементами ИИ. Такое оружие в разы повышает потенциал частей и соединений и не только сегодня, но и в ближайшем будущем станет во многом определять исход боя» [2]. В апреле 2022 г. на очередном заседании коллегии Минобороны России глава военного ведомства С.К. Шойгу подчеркнул, что развитие системы связи Вооруженных Сил РФ идет по пути использования передовых телекоммуникационных технологий, в том числе с внедренными элементами ИИ. Применение технологий, содержащих эти элементы, уже позволило в десятки раз сократить время доведения целеуказания до комплексов высокоточного оружия большой дальности, таких как «Калибр» и «Кинжал» [3].

Сетецентрическая система ведения боя предполагает использование ИИ [4]. Поскольку сетецентрическая концепция подразумевает интеграцию войск во время военных действий в едином информационном поле, то роль ИИ в этой системе заключается в поддержке принятия решений путем автоматической обработки информации и формирования предложений для принятия окончательного решения.

Одними из важных направлений использования технологий ИИ являются разведка и реализация связанных с ней задач распознавания типов средств воздушно-космического нападения (СВКН) противника в ходе подготовки и ведения боевых действий. В данный момент для решения этих задач широко применяется технология нейросетей. Во время обучения нейросеть выявляет сложные зависимости между входными и выходными данными и получает с высокой вероятностью корректный результат.

Другим направлением использования технологий ИИ являются автономные боевые и обеспечивающие мобильные средства, включающие в себя элементы ИИ, в результате чего эти средства становятся способными действовать самостоятельно и продолжать выполнение задания в случае потери связи с центром управления. Примеры такой техники – автономные наземные машины, беспилотные летательные, а также подводные аппараты. В них реализованы главным образом технологии ИИ, внедренные в специальное программное обеспечение бортовых систем управления.

Системы управления оружием, обладающие элементами ИИ, широко применяются в комплексах противоракетной и противовоздушной обороны. Внедрение технологий ИИ в указанные системы призвано обеспечивать ускорение обработки данных, поступающих от средств разведки и контроля воздушно-космической обстановки, а также автоматическое управление огневыми средствами. Перспективы создания и применения противником гиперзвуковых средств для удара приведет к существенному сокращению времени принятия решений и ответных действий. Внедрение и совершенствование технологий ИИ в системе управления Воздушно-космических Сил позволят формировать и решать информационно-расчетные задачи в реальном времени с учетом постоянно меняющейся обстановки.

Важными направлениями использования технологий ИИ являются анализ радиоэлектронной обстановки в зоне боевых действий, определение типов радио- и радиолокационных излучений и их источников, перевод многоязычной речи и текстов, интеграция разрозненных геолокационных сведений, оценка тактического назначения и характеристик СВКН по результатам их наблюдения [5].

Технологии ИИ широко применяются в учебно-тренировочных средствах (УТС) – имитационных тренажерах отдельных образцов ВВСТ на базе персональных компьютеров и систем вооружения с высокой достоверностью воспроизведения окружающей обстановки, а также в тренажерах, сопряженных с реальными комплексами вооружения. Использование ИИ в УТС обеспечивает реалистичное

визуальное воспроизведение динамически меняющейся боевой обстановки, имитацию поступающей от различных источников информации, внешних условий (времени года, дня; погоды и т. п.). Современные УТС с элементами ИИ способны объединяться и образовывать сеть, применяться для отработки действий в составе экипажа. Имеющиеся в Вооруженных Силах РФ УТС с элементами ИИ максимально отражают особенности подготовки и использования различных видов ВВСТ: от стрелкового оружия, артиллерийских установок, танков, самолетов, беспилотных летательных аппаратов до образцов ВВСТ Военно-Морского Флота и космических войск.

Еще одно направление использования ИИ – логистические системы, предназначенные для постоянного автоматического анализа технических параметров, поступающих от различных датчиков, размещенных в средствах вооружения, и определения необходимости, объема и сроков проведения ремонтных работ.

Совершенствование маневренных характеристик современных и перспективных авиационных комплексов, а также повышение сложности их боевого применения привело к ужесточению требований, предъявляемых к диагностике состояния здоровья летного состава. Кардинальное повышение достоверности информации о текущем состоянии здоровья возможно за счет внедрения технологий ИИ в средства диагностики. Ожидается, что использование технологии ИИ в указанных средствах позволит на 25...30 % уменьшить число авиационных происшествий, возникающих под воздействием человеческого фактора, и экономические потери, случающиеся по той же причине, в 1,5...2 раза.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ основных направлений использования технологий ИИ, призванных обеспечить обороноспособность Российской Федерации, показывает, что дальнейшее повышение эффективности Вооруженных Сил РФ зависит от улучшения показателей оперативности и точности применения оружия, степени минимизации ошибок, вызванных человеческим фактором при планировании и ведении боевых действий, качества оптимизации логистических процессов в мирное и военное время. Дальнейший путь использования ИИ в военной сфере может быть определен в ходе анализа доступных зарубежных и отечественных материалов, в том числе планов и конкретных программ. При этом количество направлений и способов применения ИИ в военной сфере будет постоянно увеличиваться по мере того, как будут выдвигаться новые идеи и выпускаться реализующие эти идеи технологии.

Некоторые направления, особенно в иностранных государствах, с небольшими изменениями заимствуются из гражданской научной сферы, поскольку чаще всего прорыв в сфере, изучающей ИИ, происходит в лабораториях, которыми управляют компании из Кремниевой долины и лучшие университеты, а не подрядчики Минобороны. В России же ситуация другая: инновационные технологии создаются в оборонной промышленности, а спустя некоторое время начинают применяться в мирных областях жизнедеятельности человека. По словам первого заместителя министра обороны РФ Р.Х. Цаликова, военное ведомство Российской Федерации «возглавляет практически все прорывные технологические направления, которые разрабатываются в стране» [7].

Программное обеспечение является крупнейшим сегментом рынка ИИ-продуктов, разрабатываемых для удовлетворения нужд армии. Ожидается наибольший рост финансовых вложений именно в разработку и совершенствование указанного обеспечения, что можно объяснить высокой значимостью софта в усилении инфраструктуры информационных технологий. В то же время существуют некоторые

организационные и технические ограничения, накладываемые в Российской Федерации на развитие и применение технологий ИИ. Имеет место дефицит задействованных в исследовании ИИ кадров, возникший из-за санкций, принятых в отношении РФ в связи с проводимой на территории Украины с 24 февраля 2022 г. специальной военной операцией. Доступ к зарубежным технологиям ограничен, велика зависимость от поставок из-за рубежа оборудования и комплектующих. Недостаточно разработанное технико-экономическое обоснование внедрения технологий ИИ также не способствует решению задачи развития этих технологий. В настоящее время проводится, несмотря на указанные ограничения, работа по формализации задач интеллектуализации военной сферы, их структуризации, определении отдельных подзадач, а также адекватных интеллектуальных методов их решения.

Российские компании, осуществляющие разработку технологий ИИ для внедрения в образцы вооружения, регулярно представляют свои предложения на международных и российских площадках. Так, в числе экспонатов международного военно-технического форума «Армия-2022» особый интерес вызвали предложения по использованию технологий ИИ, выдвинутые ФГУП «ГосНИИАС», ЗАО НТЦ «Модуль», технополисом «Эра», Институтом прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук. Представленные этими организациями программное обеспечение и оборудование могут быть применены для совершенствования средств и систем разведки, создания перспективных систем поддержки принятия решений, обработки и анализа больших данных, а также при моделировании процессов функционирования техники.

Министерство обороны Российской Федерации уделяет значительное внимание вопросам использования технологий ИИ. В 2021 г. было сформировано управление развития технологий ИИ Министерства обороны Российской Федерации, на постоянной основе работает дирекция по вопросам развития и внедрения технологий в образцы вооружения, которая привлекает к своей работе ведущие в этой области предприятия и организации промышленности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важнейшую роль в обеспечении безопасности государства (как СССР, так и Российской Федерации) начиная со второй половины XX в. играла эффективность автоматизированного управления войсками и оружием. Уровень автоматизации процессов, связанных с решением таких разведывательно-информационных задач, как поиск, обнаружение и сопровождение целей, целераспределение и уничтожение наземных, воздушных, надводных, подводных, а затем и космических объектов определялся имеющимися на то время техническими возможностями средств вычислительной техники.

Сегодня Вооруженные Силы Российской Федерации находятся на пороге следующего этапа автоматизации – этапа разработки и внедрения технологий ИИ в образцы ВВСТ. Появление в XXI в. возможностей разработки и внедрения технологий искусственного интеллекта в системы военного назначения непосредственно связано с большим научно-техническим прогрессом в области создания сверхмощных комплексов и систем.

В качестве перспективных направлений использования технологий ИИ в системах вооружения следует рассматривать комплексирование информации от различных средств разведки, создание систем поддержки принятия решений, автоматическое централизованное управление роботизированными образцами вооружения, совершенствование систем боевого и технического обеспечения военных

действий. Реализация указанных направлений позволит максимально повысить боевые возможности видов и родов войск Вооруженных Сил Российской Федерации в интересах повышения эффективности решения задач обороны и обеспечения безопасности страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации: Указ Президента Рос. Федерации от 10.10.2019 № 490 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201910110003> (дата обращения: 18.07.2022).

2. Расширенное заседание Коллегии Минобороны [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/64684> (дата обращения: 18.07.2022).

3. Тихонов А. В национальном центре управления обороной Российской Федерации под руководством главы военного ведомства генерала армии Сергея Шойгу состоялось заседание Коллегии Минобороны России // *Красная звезда*. 20 апреля 2022 г. URL: <http://redstar.ru/s-uchyotom-haraktera-voennyh-ugroz/> (дата обращения: 19.07.2022).

4. Алексеева Н., Медведева А. Единая система: как Минобороны внедряет сетцентрическую модель ведения операций [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://russian.rt.com/russia/article/823816-setecentricheskie-ucheniya-esu-tz> (дата обращения: 19.07.2022).

5. Галкин Д.В., Коляндра П.А., Степанов А.В. Состояние и перспективы использования искусственного интеллекта в военном деле // *Военная мысль*. 2021. № 1. С. 113–124.

6. Николайчук А.С. Может ли искусственный разум стать причиной мировой войны [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mcs.mail.ru/blog/mozhet-li-iskusstvennyj-razum-stat-prichinoj-mirovoj-vojni> (дата обращения: 20.07.2022).

7. Вооруженные силы РФ внедряют технологии искусственного интеллекта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://warfiles.ru/176763-vooruzhennye-sily-rf-vnedryayut-tehnologii-iskusstvennogo-intellekta.html> (дата обращения: 20.07.2022).

Для цитирования: Алехин Т.Ю. Основные направления использования технологий искусственного интеллекта в интересах обеспечения обороны и безопасности государства // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 1 (17). С. 87–91.

THE MAIN DIRECTIONS OF TECHNOLOGY USE ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE INTERESTS OF ENSURING THE DEFENSE AND SECURITY OF THE STATE

T.Yu. ALEKHIN, Dr. Sc.

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

The article is devoted to the analysis of forecasts about the possible nature of future wars and possible areas of application of artificial intelligence in military systems and complexes in the interests of ensuring the defense and security of the Russian Federation.

Keywords: artificial intelligence technologies, decision support stems, autonomous combat systems, logistics systems, automation complexes, samples of capons.

Поступила в редакцию/ricived: 13.09.2022; после рецензирования/revised: 13.10.2022; принята/accepted: 15.11.2022

Вестник Тверского государственного технического университета.

Серия «Технические науки». № 1 (17), 2023

ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМЫ КРИТЕРИЕВ ЗАЖЖЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ БАКОВ ОСКОЛОЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ*

О.Ю. ФЕДОСОВ, канд. техн. наук

Управление перспективных межвидовых исследований
и специальных проектов Минобороны России,
119160, Москва, Комсомольский проспект, 18, e-mail: olefed78@mail.ru

© Федосов О.Ю., 2023

Проведено обоснование системы критериев зажжения топливных баков транспортных средств при воздействии высокоскоростных осколочных элементов на основе современных представлений теории горения топливно-воздушных смесей в турбулентном потоке. Рассмотрен физический механизм процесса около- и внутрибакового зажжения паров топлива высокоскоростным осколочным элементом для топливных баков, защищенных обшивкой транспортного средства. Представлены пять критериев зажжения топливных баков, выполнение которых приводит к поражению топливного бака. Предложена формула условной вероятности поражения отсеков, содержащих топливный бак к зажигательному действию осколочных элементов. Показана структурная блок-схема математической модели расчета условной вероятности поражения топливных баков.

Ключевые слова: канал перфорации, кинетический нагрев, критерий, моделирование, рециркуляция, сверхскоростное взаимодействие, температура.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-1-92-102

ВВЕДЕНИЕ

Под воздействием высокоскоростного осколочного элемента (ОЭ) на топливную систему объекта зажжение паров топлива может произойти как внутри топливного бака (ТБ), так и в околобаковом пространстве. Исследование процесса зажжения топливной системы (ТС) высокоскоростными ОЭ направлено на установление количественных соотношений между исходными параметрами ОЭ и отсека, содержащего ТБ, и результатами воздействия: взрывом, пожаром, разрушениями в отсеке. Поскольку зажжение происходит в процессе потери сплошности среды внутри ТБ и турбулентного перемешивания его содержимого, обоснование системы критериев зажжения ТБ объекта в данной работе строится на современных трактовках теории горения топливно-воздушных смесей в турбулентном потоке.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим физический механизм процесса околобакового зажжения паров топлива (рис. 1). Осколочный элемент, движущийся с большой скоростью, пробивает

* Материалы были представлены на научном семинаре «Золотовские чтения», посвященном 100-летию со дня рождения выдающегося российского математика, академика АН СССР Золотова Евгения Васильевича (6–7 октября 2022, Тверь, Тверской государственный технический университет).

обшивку ТБ. После этого летит следом за ОЭ поток частиц – запреградное осколочное поле (ЗОП). Частицы имеют высокую температуру, при движении в воздухе происходит их теплообмен с воздухом. Из-за того, что время движения частиц мало, а их теплоемкость большая (по сравнению с теплоемкостью воздуха), частицы практически не остывают, остаются в расплавленном состоянии и по достижении стенки ТБ прилипают к ней или пробивают ее. Частицы, в зависимости от скорости движения, могут существовать в пространстве между внешней обшивкой и стенкой ТБ некоторое время и нагревают при этом воздух. В зоне факела распыла поток частиц материала обшивки и ОЭ температура газа становится выше, чем в окружающем эту зону газе.

После пробития стенки ТБ ОЭ внедряется в жидкость (керосин). Вместе с ним в керосин попадают некоторые частицы от обшивки, движущаяся следом за ОЭ, и ЗОП от обшивки и стенки ТБ. Часть нагретых частиц стенки ТБ движется в обратном направлении, к обшивке. Они также подогревают газ в пространстве между обшивкой и стенкой ТБ в зоне образовавшихся пробойн.

При внедрении лидирующего ОЭ и ЗОП в жидкость в ней происходят кавитация и частичное испарение жидкости при ее контакте с горячим лидирующим ОЭ и ЗОП, попавшим в жидкость. Пары жидкости выбрасываются в пространство между обшивкой и стенкой ТБ в предварительно разогретый объем воздуха. Кроме того, после прохождения лидирующего ОЭ глубоко в жидкость можно ожидать возникновения кумулятивного эффекта в ней: схлопывания образовавшихся при прохождении ОЭ кавитационных полостей и связанного с этим попадания струек жидкости в образовавшееся отверстие в стенке ТБ. Эти струйки распадаются и образуют поток капель, стремящийся к обшивке объекта. Некоторые из этих капелек могут достигнуть поверхности обшивки, предварительно подогретой при пробитии, и испариться.

В результате всех перечисленных процессов в пространстве между обшивкой объекта и стенкой ТБ образуется область (облако) нагретой до некоторой температуры паро-газо-капельной смеси, способной к самовоспламенению. Эта область (облако) окружена газом, имеющим начальную температуру окружающей среды.

В нагретом облаке паро-газо-капельной смеси начинается химическое реагирование (из-за того, что окислитель и горючее смешаны). Скорость химической реакции нарастает или убывает по закону Аррениуса [1], что обуславливается соотношением быстроты тепловыделения в паро-газо-капельном облаке, происходящего за счет химического реагирования, и отвода тепла в окружающее пространство – облако воздуха (на периферии пути пробития).

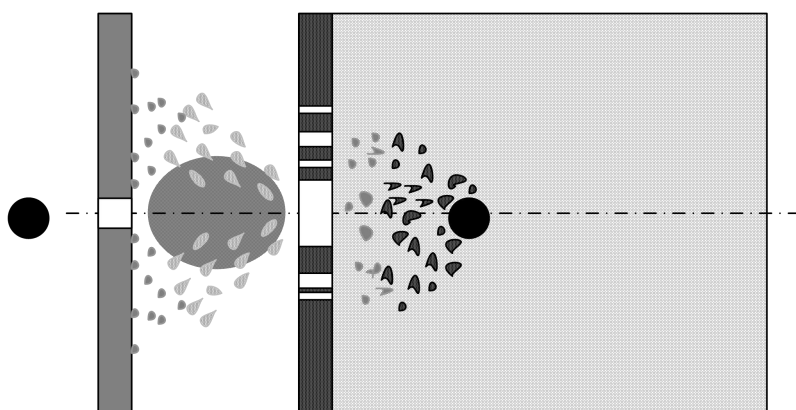


Рис. 1. Механизм процесса зажигания ТБ высокоскоростным ОЭ

Два указанных процесса (тепловыделение и теплоотвод) определяют критические условия (критические характеристики области), при которых существует неустойчивое

тепловое равновесие. Если параметры облака превышают критические, то происходят самовоспламенение и затем зажжение, если не превышают – то затухание химического реагирования.

Наглядное представление о процессах, обуславливающих зажжение и дальнейшее развитие ситуации (устойчивое горение либо затухание), дает схема движения ОЭ в массиве армированного (сжимаемого) жидкого топлива (горючего), представленная на рис. 2 [2].

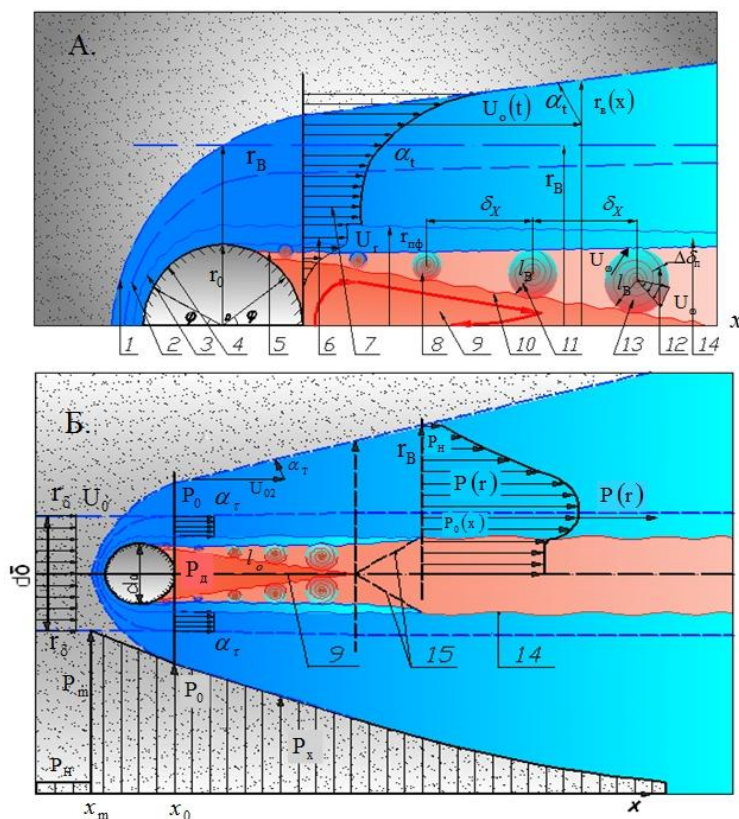


Рис. 2. Схема процесса турбулентного перемешивания топлива в ТБ в ближнем аэродинамическом следе за единичным ОЭ: 1 – головная ударная волна в сжимаемой жидкости перед ОЭ; 2 – передняя граница подогрева жидкости (тепловой пограничный слой); 3 – граница жидкости или фазового перехода из жидкости в пар; 4 – граница шарика-осколка; 5 – передняя граница вихревого свободного пограничного слоя; 6 – эпюра профиля скорости свободного пограничного слоя; 7 – эпюра профиля скорости сжатой струйки жидкости радиуса r_0 ; 8 – крупный вихрь вихревого слоя; 9 – зона рециркуляции; 10 – нижняя граница вихревого слоя, огибающая крупные вихри; 11 – максимальный радиус вращения крупного вихря (l_B); 12 – сечение захвата паровой струйки крупным вихрем ($\Delta\delta_n$); 13 – схема течения крупного вихря; 14 – жидкая стенка канала перфорации начала дальнего следа; 15 – скачок присоединения

Поскольку описанные физические процессы, приводящие к зажжению, многообразны, у математических моделей может быть, в зависимости от сложности и степени учета этих процессов, несколько уровней.

Самовоспламенение паро-газо-капельной реагирующей в газовой фазе смеси заданного объема и температуры в окружении нереагирующего газа происходит с меньшей температурой. Математическая модель представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, выражающих законы сохранения массы и энергии в осредненных по объему параметрах, учитывающих межфазный тепло- и массообмен. В задаче также имеются критические условия самовоспламенения (критическая температура и критический диаметр облака). Такой подход позволяет учесть основные теплофизические, химико-кинетические параметры и начальные условия, определяющие самовоспламенение и последующее зажжение, связать характеристики ОЭ, обшивки объекта и стенки ТБ с величинами этих параметров и приблизительно спрогнозировать, зажжется или не зажжется керосин после пробития обшивки и стенки ТБ.

При проникновении ОЭ со сверхзвуковой скоростью в ТБ позади ОЭ возникает зона, которую определим как канал перфорации ОЭ (есть еще канал перфорации горючего), в котором образуется зона рециркуляции ближнего воздушного следа, затягиваемого в канал перфорации горючего самим ОЭ. Остановимся подробнее на соотношениях, обуславливающих геометрические, термодинамические и гидрогазодинамические параметры процесса проникания ОЭ, его лобового, парового и жидкого пристеночного пограничных слоев, донной зоны рециркуляции со свободным пограничным слоем и вихревой составляющей. Все эти параметры определяют критерии зажжения.

Результаты экспериментальных исследований, представленные в [2], показывают, что при пробитии ОЭ модели ТБ с типом керсина ТС-1, заполненного пенополиуретаном (ППУ) ОЭ-100, при некоторых определенных параметрах процесса соударения происходит зажжение паров керосина внутри ТБ, и, как следствие, керосин начинает гореть. Поскольку зажжение происходит в процессе потери сплошности среды внутри ТБ и турбулентного перемешивания его содержимого, обоснование системы критериев зажжения ТБ ВЦ в данной работе строится на современных представлениях теории горения топливно-воздушных смесей в турбулентном потоке, основной вклад в развитие которой внесли российские ученые И.В. Беспалов, А.Г. Прудников, Е.С. Щетинков [3] и тепловой теории Я.Б. Зельдовича [4]. Данные теории соответствуют тем процессам, которые возникают при попадании высокоскоростного ОЭ внутрь ТБ.

Согласно современным представлениям теории горения топливно-воздушных смесей в турбулентном потоке, в канале перфорации на границе зоны рециркуляции ближнего воздушного следа образуются крупные вихри, которые могут обеспечить требуемую стехиометрию и другие условия для возгорания образовавшихся топливных локальных смесей [3].

Однако, как показали экспериментальные исследования [2], пробитие ОЭ модели ТБ с керосином типа ТС-1, заполненного ППУ, не всегда приводит к зажжению паров этого керосина (так, видимое возгорание необязательно переходит в пожар). Из этого следует важный вывод, что необходимым условием для поражения ТБ является выполнение не только критериев зажжения, но также критерия процесса распространения горения.

Проведенный анализ показывает, что процесс поражения ТБ обуславливают несколько факторов, главными из которых выступают температура, энергия потока ОЭ, проникающих в ТБ, критериальная стехиометрия газовой смеси и условия для распространения горения. Следовательно, образование высокотемпературного очага пожара из продуктов горения и массы выбитого вещества, которая способна нагреть воздух между преградами до высокой температуры и создать критические условия для зажжения окружающих паров керосина, будет определяться комбинацией нескольких

критериев. Невыполнение хотя бы одного из них приведет к непоражению ТБ объекта за счет зажигательного действия ОЭ. Поэтому при оценке эффективности зажигательного действия ОЭ по ТБ предлагается использовать систему, состоящую из пяти критериев зажжения. Рассмотрим первый из них, который назовем критерием кинетического нагрева $K_{p1}(KH)$.

При зажигании нагретым телом температура его поверхности может быть больше температуры самовоспламенения, однако зажигания не произойдет. Дело в том, что у поверхности температура быстро падает, а концентрация горючего снижается. Баланс тепла при этом менее благоприятен, чем при самовоспламенении. Предельная критическая температура зажигания оказывается выше температуры самовоспламенения. Эта разница тем больше, чем меньше размер источника тепла (нагретого тела). Причем чем меньше размеры (облако) зажигающего тела и чем больше его скорость, тем выше должна быть его температура для того, чтобы готовая топливовоздушная смесь начала гореть [1, 3].

Таким образом, первый критерий определяется свойствами топлива, так как для каждого вида топлива существует критическое значение температуры $T_{кр}$, ниже которой зажжения не происходит:

$$K_{p1}(KH) = T / T_{кр} \geq 1,$$

где $T_{кр}$ – температура продуктов полного сгорания стехиометрической смеси, которая является справочной величиной [3].

При решении задачи о воспламенении паров керосина, смешанного с воздухом, необходимо знать температуру T , которая образуется при нагреве потоком частиц парогазо-воздушной смеси. Поскольку время движения частиц ЗОП мало, а их теплоемкость большая (по сравнению с теплоемкостью воздуха), частицы остывают не сильно, остаются в расплавленном состоянии и по достижении стенки ТБ. Необходимо отметить, что для нагрева цилиндрического объема воздуха диаметром 10 мм и высотой 100 мм с температурой 300 К до температуры 600 К требуется всего 3 Дж энергии [3].

Для расчета текущей температуры может применяться математическая модель, разработанная в Научно-исследовательском институте прикладной математики и механики Томского государственного университета [5], позволяющая оценивать возникающее распределение температуры в условиях высокоскоростного удара.

Второй критерий, выполнение которого необходимо для зажжения ТБ, находят из условия минимальных механических разрушений, необходимых для создания каверны (зоны горения), диаметр D должен превышать минимальный ($D_{кр}$), ниже которого зажжения также не происходит [2]. Выполнение данного условия обозначим как критерий (с индексом «2») минимальной перфорации стенки ТБ и канала армированного жидкого топлива, численно равный

$$K_{p2}(ПФ) = D / D_{кр} \geq 1.$$

Армирование ППУ кардинально меняет процессы, возникающие внутри ТБ после воздействия. До настоящего времени считалось, что армирование ППУ приводит к невозможности поражения ТБ за счет зажигательного действия. Однако проведенные экспериментальные исследования [2] показали, что при увеличении энергетики воздействующего ОЭ может произойти механическое повреждение ТБ с вырыванием части ППУ. В этом случае исчезают препятствия для образования смесового облака с критическим диаметром. Экспериментально установлено, что для керосина типа ТС-1 при диаметре канала перфорации армированного жидкого топлива менее 29 мм горение ТБ с ППУ не происходит. Поэтому в качестве $D_{кр}$ в [2] предлагается использовать

критериальный параметр, равный 29 мм. Значение D в [2] рассчитывается по формулам «Модель 1В».

Рассмотрим третий (с индексом «3») критерий задержки, или периода индукции воспламенения, обозначенный как $K_{p3}(ИИ)$. Период индукции химической реакции воспламенения, согласно [3], должен быть меньше (или равен на границе действия этого критерия) времени совместного пребывания горючего и воздуха (окислителя). Периодом индукции, или временем запаздывания самовоспламенения, называют время, за которое в горючем веществе с температурой T_0 достигается температура самовоспламенения T_c [3]. Согласно тепловой теории [4], под температурой самовоспламенения понимают самую низкую температуру вещества, при которой происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций, заканчивающихся возникновением пламенного горения (то есть когда тепловыделение и теплоотвод становятся равны). При определении температуры самовоспламенения невозможно измерить период индукции, поэтому за этот период принимают время с момента нагрева вещества до появления пламени.

При попадании ОЭ в горючую смесь паров или газов с воздухом некоторый объем смеси нагревается и одновременно охлаждается ОЭ. Воспламенение смеси в этом случае зависит от соотношения периода индукции смеси и времени охлаждения ОЭ. Если период индукции больше времени охлаждения ОЭ до температуры, которая ниже температуры самовоспламенения, то воспламенения смеси не происходит. Если же период индукции меньше времени охлаждения ОЭ, смесь воспламеняется [4].

Температура самовоспламенения горючего вещества не является постоянной величиной. Эта температура, согласно тепловой теории самовоспламенения, зависит от скорости тепловыделения и скорости теплоотвода, которые в свою очередь обуславливаются объемом горючего вещества в ТБ, его концентрацией, давлением, формой ТБ (удельной поверхности теплоотвода) и пр. С увеличением объема ТБ скорость теплоотвода уменьшается, температура самовоспламенения должна понижаться соответственно, хотя, как эксперименты показывают, при объеме горючего вещества более 12 л температура самовоспламенения горючей смеси изменяется незначительно [2]. Объясняется это тем, что в значительных объемах горючая смесь самовоспламеняется не сразу по всему своему объему, а в тех местах, в которых создались наиболее оптимальные условия. Температура самовоспламенения смеси возрастает с уменьшением диаметра ОЭ (подобно тому, как увеличивается температура самовоспламенения газовой смеси при уменьшении ее объема).

Период индукции для одного и того же вещества неодинаков и зависит от состава горючей смеси, температуры и давления. Чем ниже температура нагрева горючего вещества при самовоспламенении, тем больше период индукции. Температура самовоспламенения горючей смеси уменьшается при повышении давления, что обусловлено увеличением скорости реакции [6].

Критерий задержки, или периода индукции воспламенения, $K_{p3}(ИИ)$ определяется по формуле, предложенной А.Г. Прудниковым [6]:

$$K_{p3}(ИИ) = \frac{\tau_{ind} u_0}{12 d_0} \quad 1,$$

где u_0 – скорость ударной волны; d_0 – диаметр ОЭ, в которой

$$\phi_{ind} = \frac{\exp \frac{893}{T_g}}{P_g^{1.7}} + \frac{8 \cdot 10^{-3} \exp \frac{9600}{T_g}}{P_g},$$

где g – индекс параметра в донной зоне рециркуляции; P_g – донное давление, бар; $T_g = T_n / \tau(M_o)$ – температура воздуха в донной зоне рециркуляции К; T_n – начальная температура воздушного потока (для $H = 0$ км $T_n = 288$ К),

Структурная схема расчета критерия задержки или воспламенения $K_{p3}(IH)$ представлена на рис. 3.

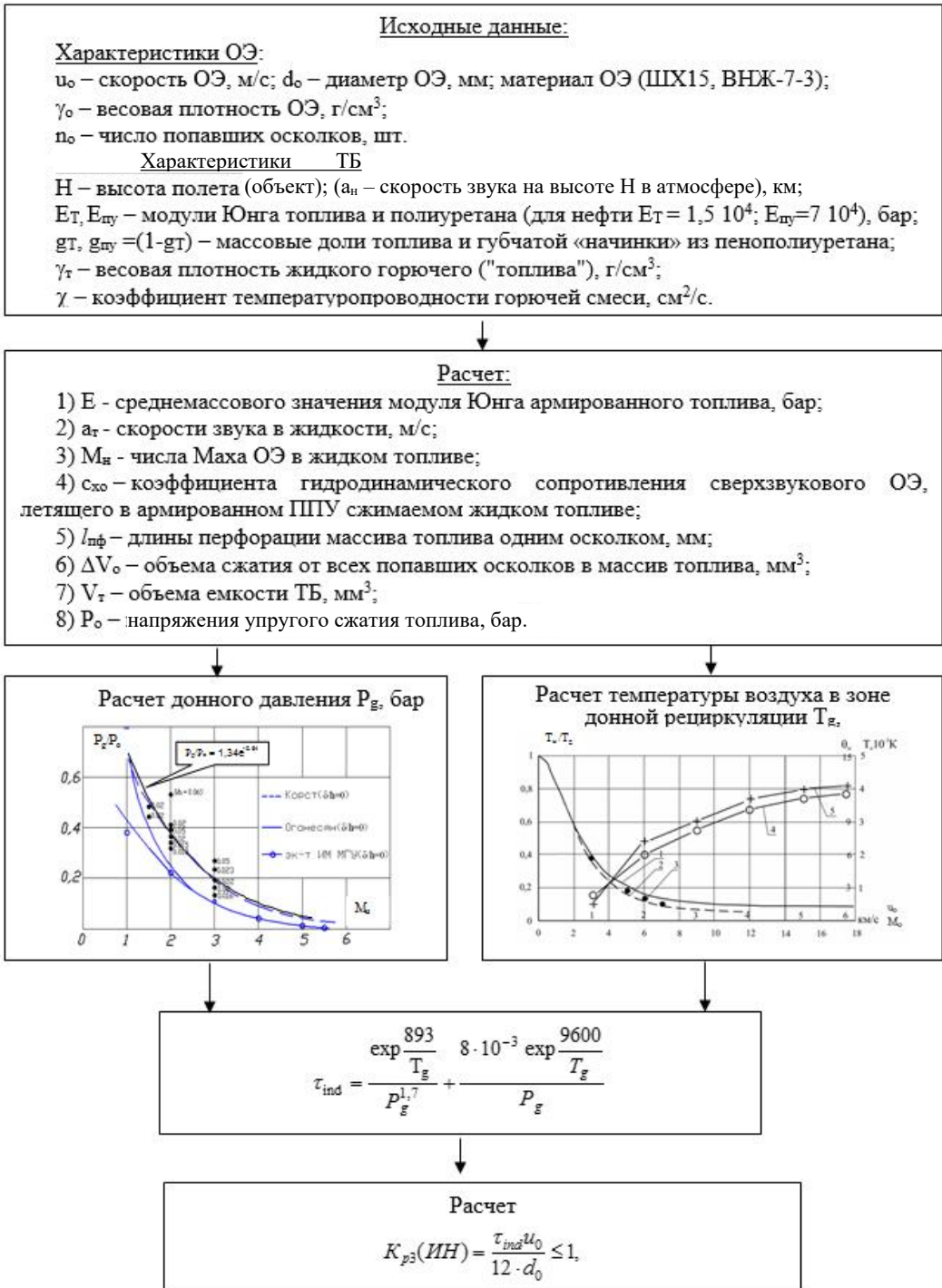


Рис. 3. Структурная схема расчета критерия задержки, или периода индукции, воспламенения $K_{p3}(IH)$

Гидродинамика потока гомогенных и гетерогенных смесей в следе за плохо обтекаемым телом наиболее основательно рассмотрена в [6, 7]. Турбулентное горение представляет собой беспорядочный, нестационарный процесс турбулентного смешения объемов продуктов сгорания и свежей смеси и реагирование последней вследствие повышения ее температуры. Скорость движения объемов турбулизированной среды обуславливается скоростью вращения вихрей. Эти объемы (а вместе с ними и заключенная в них субстанция) могут перемещаться по турбулизированной среде

практически неограниченно со скоростью, определяемой коэффициентом турбулентной диффузии. Поэтому параметры потока, в отличие от ламинарного фронта пламени в турбулентной зоне сгорания, будут случайными функциями от координат пространства и времени (в частности, мгновенное значение параметра потока и температура в произвольной точке турбулентного факела не равны средней по времени температуре в этой же точке).

Условия воспламенения горючей смеси зависят от предложенного А.Г. Прудниковым критерия (с индексом «4») $K_{p4}(BC)$, определяющего режим микротурбулентного горения крупных вихрей свободного пограничного слоя ближнего следа ОЭ [6]:

$$K_{p4}(BC) = \frac{v_0 \tau_{ind}}{7 l_{zp}} \geq 1,$$

где v_0 – среднеквадратичная скорость турбулентности в крупных вихрях, м/с; $l_{zp} \approx 2d_0$ – длина зоны рециркуляции за ОЭ, мм.

Проведенные исследования показали [2], что вспышка горючей смеси может произойти, но распространения фронта пламени ламинарного горения в окружающую горючую смесь не будет. В рассматриваемых условиях для этого, согласно теории теплового воспламенения Я.Б. Зельдовича, необходимо, чтобы за время, в течение которого заканчивается вспышка горючей смеси толщина очага вспышки была бы (по меньшей мере) равна двойной толщине ламинарного фронта пламени [4], то есть условие распространения фронта горения вдоль столба горюче-воздушной смеси (в канале перфорации ОЭ от зажженных объемов смеси конечного сечения ближнего следа) можно записать в виде пятого критерия распространения горения (с индексом «5»):

$$K_{p5}(P\Gamma) = \frac{\tau_{\phi\phi}}{\tau_{преб}} = \frac{D_m u_0}{u_n^2 12 d_0} \geq 1,$$

где $\tau_{\phi\phi} \approx \frac{D_m}{u_n^2}$ – время формирования фронта горения (по тепловой модели горения

Я.Б. Зельдовича); $D_m = D_m^o \frac{T_g}{T_n}^{1,75}$ – зависимость молекулярной диффузии от температуры.

$\frac{u_n}{u_0} \approx \frac{u_n^{0,2} V_{TC}^{0,8}}{u_0}$ – зависимость интенсивности турбулентного, гомогенного

горения от u_n, V_{TC} .

Структурная блок-схема математической модели расчета условной вероятности поражения ТБ представлена на рис. 4. Входными параметрами (аргументами) этой модели являются начальные параметры воздействия ОЭ. Выходным параметром математической модели служит условная вероятность поражения ТБ.

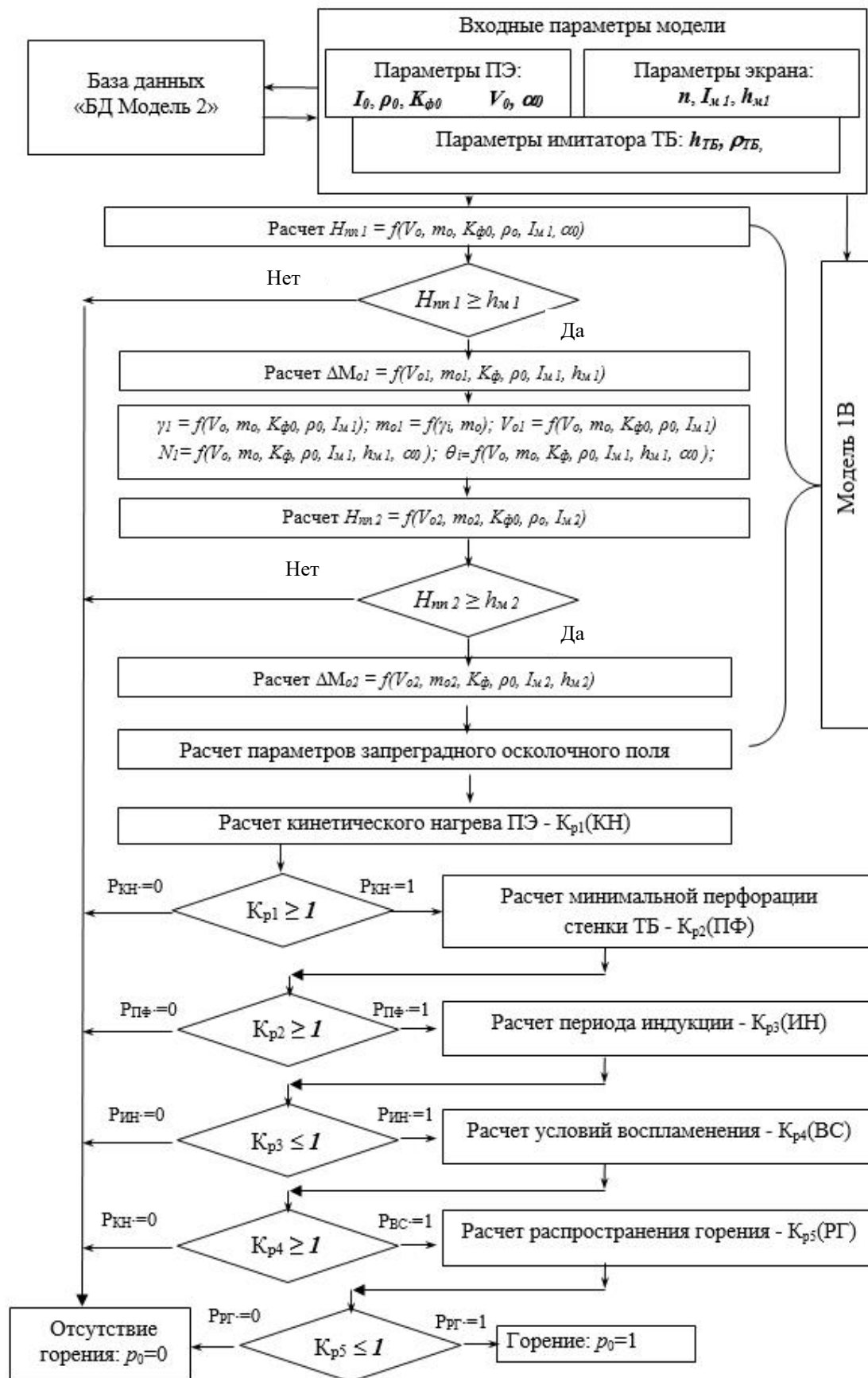


Рис. 4. Блок-схема математической модели расчета вероятности поражения ТБ

Алгоритм расчета вероятности зажжения ТБ цели p_0 можно представить следующим образом. Стенка ТБ – последняя преграда, после ее пробития определяются параметры осколочного поля, попавшего в ТБ. Результаты расчета параметров осколочного поля, попавшего в ТБ, являются начальными параметрами для последовательного расчета пяти критериев зажжения ТБ: кинетического нагрева $K_{p1}(KH)$; минимальной перфорации $K_{p2}(ПФ)$; задержки, или периода индукции воспламенения, $K_{p3}(ИН)$; условия воспламенения $K_{p4}(ВС)$; распространения горения $K_{p5}(РГ)$ (для физической модели). При невыполнении любого из них считается, что вероятность поражения $p_0 = 0$. Если все пять критериев выполняются, то $p_0 = 1$.

С учетом вышеизложенного условная вероятность поражения исходных отсеков, содержащих ТБ, из-за зажигательного действия ОЭ будет определяться по формуле

$$p_0 = P_{KH} \cdot P_{ПФ} \cdot P_{ИН} \cdot P_{ВС} \cdot P_{РГ},$$

где P_{KH} – вероятность кинетического нагрева паров топливной смеси осколками выше критического значения температуры для данного вида топлива; $P_{ПФ}$ – вероятность механического разрушения (перфорации) стенки ТБ с образованием канала перфорации армированного жидкого топлива, диаметр которого превышает критический; $P_{ИН}$ – вероятность, учитывающая время запаздывания самовоспламенения в процессе зажжения ТБ; $P_{ВС}$ – вероятности воспламенения топлива ОЭ при попадании его в жидкую фазу ТБ; $P_{РГ}$ – вероятность распространения горения топлива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проведении оценок чувствительности ТБ транспортных средств как сложной системы к воздействию ОЭ целесообразным оказывается иерархическое моделирование. Сначала осуществляют моделирование процесса пробития преград, защищающих топливо, для получения параметров осколочного поля, попавшего в ТБ, затем с помощью предложенной модели оценивают систему критериев зажжения топливных баков транспортных средств при воздействии высокоскоростных осколочных элементов. Зажжение ТБ указанных средств высокоскоростными ОЭ будет зависеть от реализации комбинации пяти необходимых критериев. Невыполнение хотя бы одного из них приводит, как мы отмечали, к непоражению ТБ.

С учетом вышеизложенного условная вероятность поражения ТС, содержащих ТБ, из-за зажигательного действия ОЭ будет определяться по формуле расчета условной вероятности поражения этих отсеков, приведенной ранее. Данная формула, по сути, представляет собой методику оценки зажигательного действия осколков по отсекам ТБ транспортных средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щетинков Е.С. Физика горения газов. М.: Наука. 1965. 739 с.
2. Иницирующее и зажигательное действие боевых частей зенитных ракетных комплексов: учебное пособие / под ред. В.М. Кашина. СПб.: БГТУ. 2009. 244 с.
3. Прудников А.Г. К вопросу о вихревом горении // *Физика горения и взрыва*. 2010. Т. 46. № 6. С. 12–31.
4. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука. 1980. 478 с.

5. Белов Н.Н., Демидов В.Н., Ефремова Л.В. Компьютерное моделирование динамики высокоскоростного удара и сопутствующих физических явлений // *Известия вузов. Физика*. 1992. Т. 35. № 8. С. 5–48.

6. Прудников А.Г., Подвальный А.М. Высокопроизводительные вычислительные алгоритмы замкнутых систем статистических уравнений и уравнений теплогазоаэродинамики многосредной механики взаимодействующих сред. *Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе IT+SE'11: Материалы XXXVIII Международной конференции и дискуссионного научного клуба*. Украина, Крым, Ялта-Гурзуф. 2011. С. 29–32.

Для цитирования: Федосов О.Ю. Обоснование системы критериев зажжения топливных баков осколочными элементами // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 1 (17). С. 92–102.

JUSTIFICATION OF THE SYSTEM OF CRITERIA FOR IGNITING FUEL TANKS WITH FRAGMENTATION ELEMENTS

O.Yu. FEDOSOV, Cand. Sc.

Department of Advanced Interspecific Research
and Special Projects Ministry of Defense of Russian Federation,
8, Komsomolsky Ave., Moscow, 119160, e-mail: olefed78@mail.ru

The system of criteria for ignition of fuel tanks of vehicles under the influence of high-speed fragmentation elements is justified on the basis of modern concepts of the theory of combustion of fuel-air mixtures in a turbulent flow. Gorenje is the physical mechanism of the process of near- and in-tank ignition of fuel vapor by a high-speed fragmentation element for fuel tanks protected by the vehicle skin is considered. Five criteria for igniting fuel tanks are presented, the fulfillment of which leads to damage to the fuel tank. A formula for the conditional probability of damage to compartments containing a fuel tank to the incendiary effect of fragmentation elements is presented. A structural block diagram of a mathematical model for calculating the conditional probability of damage to fuel tanks is presented.

Keywords: perforation channel, kinetic heating, criterion, modeling, recirculation, ultra-high-speed interaction, temperature.

Поступила в редакцию/reviced: 13.08.2022; после рецензирования/reviced: 13.09.2022;
принята/accepted: 15.10.2022

**ФОРМИРОВАНИЕ РАБОЧЕЙ ВЫБОРКИ
ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ***

В.В. МЕШКОВ, д-р техн. наук, Н.Н. ФИЛАТОВА, д-р техн. наук,
В.К. КЕМАЙКИН, канд. техн. наук

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

© Мешков В.В., Филатова Н.Н., Кемайкин В.К., 2023

Рассмотрена возможность объединения результатов проведенных экспериментов, зафиксированных цифровыми средствами оптического и рентгенографического наблюдения с верифицированной компьютерной моделью высокоскоростного взаимодействия твердых тел для подготовки исходных данных построения интеллектуальной системы управления защитой автономного объекта, на примере космического аппарата. Разработан способ, позволяющий оценивать степень соответствия результатов натурального и машинного экспериментов с использованием теории нечетких множеств и аппарата нечеткой логики. Для оценки модели проведена верификация результатов компьютерного моделирования характеристик зоны взаимодействия твердых тел высокоскоростного удара антропогенных частиц для типовых образцов материалов оболочки и элементов конструкции космического аппарата.

Ключевые слова: интеллектуальная система, прецедент, кластерный анализ, верификация, компьютерное моделирование, рабочая выборка.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-1-103-111

ВВЕДЕНИЕ

Значительная доля современных сложных технических систем эксплуатируется в автономных режимах и условиях невозможности оперативного управления функционированием. В связи с этим возрастает значение внедрения технологий «разумной автоматизации», реализованных в интеллектуальных системах управления [1, 2]. Для построения таких систем требуется наличие большого объема исходных данных, отражающих результаты многофакторных и быстропротекающих процессов воздействия внешних механических угроз, одним из примеров которого являются удары антропогенных частиц (АЧ) по космическим аппаратам (КА) длительного орбитального функционирования.

Для получения данных о защищенности КА от воздействия АЧ, летящих с космическими скоростями, активно используются экспериментальные и расчетные методы [3–6], которые позволяют формировать ограниченный набор прецедентов.

*Материалы были представлены на научном семинаре «Золотовские чтения», посвященном 100-летию со дня рождения выдающегося российского математика, академика АН СССР Золотова Евгения Васильевича (6–7 октября 2022, Тверь, Тверской государственный технический университет).

Увеличение объема достоверной информации, применяемой при принятии решений по управлению защитой КА, может быть обеспечено на базе объединения результатов компьютерного моделирования, экспериментальных исследований и формирования на их основе рабочей выборки интеллектуальной системы требуемого объема.

Рабочая выборка должна включать в себя:

обучающую – определена, как следует из названия, для обучения (настройки) модели;

тестовую – предназначена для оценки качества работы модели и должна быть полностью независимой от обучающей. Она обеспечивает несмещенность оценок модели (их смещенность вызывается переобучением);

валидационную – используется для подбора параметров, выбора признаков и других решений по алгоритму.

Объединение информации о сложных физических процессах, полученной с помощью разных инструментальных средств, позволит формировать любое количество прецедентов, необходимых для построения, обучения и поддержания интеллектуальной системы управления в актуальном состоянии.

Цель работы – разработка метода совместного использования результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований процесса динамического взаимодействия твердых тел для формирования рабочей выборки и ее последующего использования в технологии построения интеллектуальной системы управления защитой КА от ударов АЧ.

Задачи исследования:

создание алгоритма сравнительного анализа рентгеновских и оптических цифровых изображений, полученных в ходе эксперимента, и результатов моделирования процесса методом нечеткой логики;

построение компьютерной модели прогнозирования характеристик зоны высокоскоростного гиперзвукового удара АЧ и ее верификация;

формирование рабочей выборки для построения интеллектуальной системы управления.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основными функциями рабочей выборки является подготовка исходных данных, а также результатов различных видов моделирования (расчетно-экспериментального и компьютерного), которые будут использоваться при формировании формализованных гипотез о взаимосвязи входных и выходных переменных в задаче управления защитой КА [7].

Рабочая выборка создается в ходе работы трех программно-методических комплексов. Каждый из этих комплексов имеет свою базу данных:

ПМК-1 – комплекс расчетно-экспериментальных моделей;

ПМК-2 – комплекс компьютерного моделирования в программных средах;

ПМК-3 – комплекс совместной обработки и анализа результатов расчета и прогнозирования результатов, полученных в ПМК-1 и ПМК-2.

Обработка результатов в ПМК-3 проводится с помощью векторных моделей, построенных на основе результатов расчетно-экспериментального и компьютерного моделирования и расчетных модулей, дающих возможность провести анализ результатов натурального и вычислительного экспериментов.

В работе рассмотрены особенности компьютерного моделирования динамического взаимодействия тел в комплексе ПМК-2 с учетом экспериментальных

данных. ПМК-2 представляет собой систему компьютерного моделирования, в состав которой входят модуль расчета характеристик высокоскоростного удара АЧ; модуль анализа результатов цифровой рентгенографии и визуальных изображений; модуль верификации модели; генератор отчетов; модуль формирования рабочей выборки (рис. 1).



Рис. 1. Структурная схема ПМК-2

Задача, решаемая в интегрированной среде компьютерного моделирования, заключается в объединении результатов моделирования программными средствами с результатами эксперимента для формирования рабочей выборки требуемой структуры и объема.

Важными параметрами компьютерной модели являются адекватность описываемого ею сложного процесса и достоверность получаемых при моделировании результатов динамического взаимодействия твердых тел.

Совместный анализ результатов, полученных в ходе натурального и вычислительных экспериментов, проводился с целью верификации компьютерной

модели, реализуемой в программных средах. Для моделирования взаимодействия твердых тел выбрано современное программное средство инженерного анализа и численного моделирования ANSYS, позволяющее решать сложные задачи нелинейной динамики [8, 9].

Верификация компьютерных моделей осуществлялась на основе сопоставления параметров облака частиц, возникающего в процессе повреждения элементов и экранов, а также размеров и формы пробитых отверстий и повреждений (информация об указанных размерах и форме была получена экспериментально, с помощью рентгеновского и оптического методов) через количественную оценку этих параметров в компьютерной модели [4]. Оценка переменных величин включает в себя операции теории нечетких чисел. В ходе оценки были использованы лингвистические переменные с ограниченным терм-множеством значений [9–11].

С целью формирования общей оценки была проведена процедура преобразования нечетких оценок в оценки по новой (так называемой индексной) шкале [12].

Переход от нечетких чисел к индексной шкале обеспечивает сохранение информации лингвистических оценок и семантическую устойчивость вывода.

В качестве объекта анализа (S – сцена, ситуация) рассмотрена интегральная структура, объединяющая четыре элемента:

$$S = \langle R, F, R, D, T \rangle,$$

где $R = \{R(t_j), R(t_k)\}$ – рентгеновские изображения, полученные в ходе натурального эксперимента; $F = \{F_Left, F_Right\}$ – оптические изображения двух проекций одного фрагмента сцены; D – диаграммы, иллюстрирующие поведение объектов и полученные во время компьютерного моделирования; T – параметры, определяющие условия постановки эксперимента и результирующие характеристики.

Выбор условия постановки эксперимента и характеристик (признаков) T наиболее перспективных областей в пространстве проводился с помощью методов кластерного анализа [13, 14]. В качестве инструментального средства был применен пакет STATGRAPHICS Plus [15], реализующий иерархические методы кластерного анализа. Анализ полученных рентгенографических и оптических изображений осуществлялся с использованием методов Nearest Neighbor [13] и Ward'smethod [14], а также расчета метрики – евклидова расстояния между объектами.

Результаты иерархической кластеризации, представленные в виде специальных диаграмм (дендро- и скатерограммы), определяют плотность проводимых экспериментов в многомерном пространстве признаков. Функционал пакета STATGRAPHICS Plus дает возможность управлять размерностью признакового пространства и формировать требуемые варианты для кластеризации.

Применение кластерного анализа позволяет определить области многофакторного пространства, которые включают кластеры малой размерности или имеют большие разбросы оцениваемых параметров. Его использование обеспечило:

- решение задач оценки и обоснования признакового пространства,
- ранжирование характеристик,
- планирование проведения вычислительных экспериментов.

Анализ результатов проведенного эксперимента, зарегистрированных оптическим методом (рис. 2) и полученных при компьютерном моделировании, осуществлялся с помощью комплекса ПМК-3.

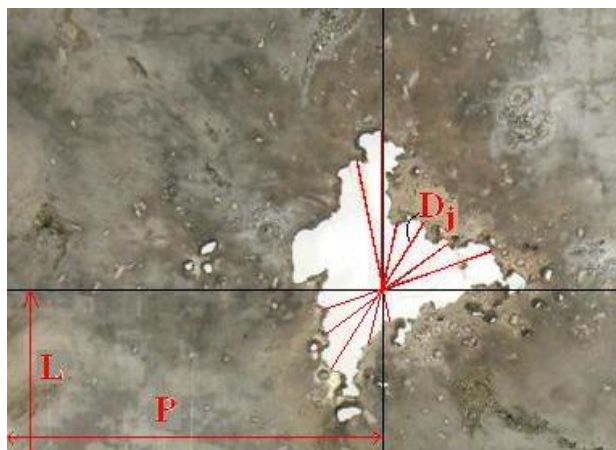


Рис. 2. Регистрация результатов эксперимента методом оптического наблюдения

Результат сравнивались на основе решения нечетких логических уравнений по следующему алгоритму:

- 1) нормализация размеров оптического изображения и изображения, полученного при компьютерном моделировании, и приведение их к единому масштабу в связанной системе координат;
- 2) метрическая оценка отклонения параметров повреждения для эксперимента и моделирования;
- 3) представление полученных значений отклонений в виде нечетких чисел;
- 4) формирование набора нечетких логических высказываний по качественной оценке различий и построение на их основе нечетких логических уравнений; оценка различий отверстий, полученных в эксперименте и при моделировании [3];
- 5) реализация нечеткого логического вывода в среде Fuzzy Logic Toolbox для получения оценки различия рассматриваемых результатов [10].

Работу алгоритма сравнения результатов, полученных на рентгенограмме и в ходе компьютерном моделировании, рассмотрим на примере регистрации облака осколков при взаимодействии твердых тел (рис. 3).

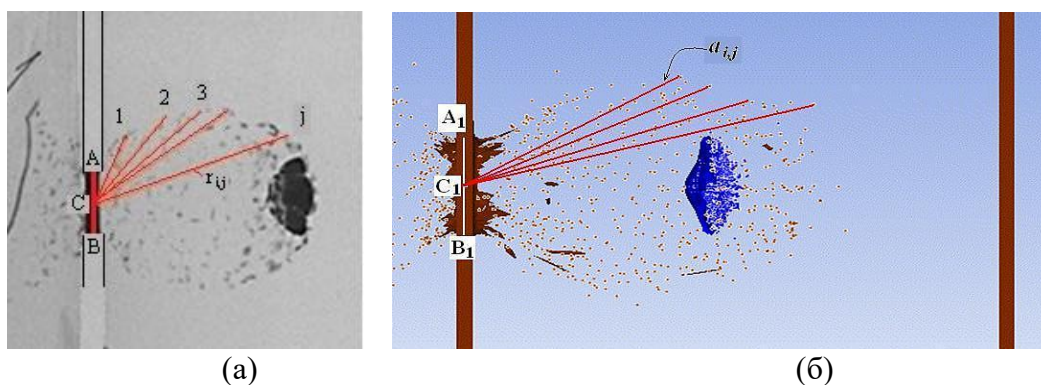


Рис. 3. Результаты взаимодействия твердых тел, полученные методом рентгеновского анализа (а) и компьютерного моделирования (б)

Приведенные результаты взаимодействия отражают условия реализованного эксперимента, включают в себя элемент случайности (неопределенности) и, как следствие, характеризуются нечеткостью границ изображения удара на рентгеновских снимках [10].

На первом этапе определялись контуры компьютерного A_i и рентгеновского R_i изображений, что позволит в дальнейшем провести нормализацию параметров повреждения в едином масштабе. Для этого площадь, ограниченную контуром R_i , разбивали на одинаковые сегменты ($j = 1, 2, \dots, m$) с началом в центре пробитого отверстия (С). Полученное множество векторов $\{r_{ij}\}$, выходящих из единого начала отсчета и покрывающих контур анализируемой фигуры, явилось исходным описанием зарегистрированного облака осколков. В дальнейшем, наложив контуры R_i и A_i и совместив центр пробитого отверстия, получили соответствующее разбиение для контура A_i . Оно также включает m сегментов и набор векторов $\{a_{ij}\}$. Результирующей оценкой различия размеров и форм двух изображений выступила сумма индексных оценок на множестве разбиения.

Результаты экспериментальных и компьютерных изображений позволили сделать вывод о достаточном соответствии параметров изображений и возможности использования метода для адекватного описания результатов взаимодействия АЧ и КА.

Новизна метода состоит в разработанном механизме оценки различий между результатами натурального и вычислительного экспериментов, основанных на использовании аппарата нечетких множеств и нечеткой логики. Алгоритмы нечеткой логики позволяют учитывать неопределенность выходных параметров, представленных оценками физических характеристик по базовой шкале, путем представления их в виде нечетких значений лингвистических переменных. Интерпретация результатов исследования с помощью лингвистических переменных формирует структуры знаний, которые позволят проводить интеллектуальный анализ результатов моделирования при формировании рабочей выборки [4].

Отличительными признаками, определяющими результаты ударов АЧ по КА, являются высокая (по сравнению со скоростью распространения в упругих телах) скорость волн; сложный характер напряженно-деформированного состояния тел; изменения свойств материалов вследствие деформации и высокой температуры; неустойчивые границы контакта; сложные фазовые переходы и др. [2].

Моделирование процесса основано на известной зависимости сжимаемого упругопластического тела [3–6, 8, 9]. Содержанием указанной модели является формализация сжатия упругопластической среды, базирующаяся на законах сохранения массы, импульса и энергии и соотношениями Прандтля – Рейсса (Prandtl-Reuss), с учетом условия текучести Мизеса.

Для получения результатов и оценки взаимодействия построена математическая модель уравнения Купера – Саймондса, реализованная в среде ANSYS/LS-DYNA и ANSYS/AUTODYN [6, 7] с помощью метода конечных элементов [4].

Верификация модели проведена на основе серии экспериментов (> 100) для ряда модельных систем и натуральных образцов КА. Так, для системы разнесенных металлических и композитных слоистых стенок (на основе углепластика и алюминиевого или титанового сплавов) она показала удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными: различие составило от 6,7 до 21,3 % (в зависимости от параметров динамического взаимодействия). Верифицированная модель позволяет изучать кинетику и стадии пробития стенок, разрушения ударного элемента и образования облака осколков при высокоскоростном ударе, что является важным аспектом фундаментальной научной проблемы изучения механизма динамического взаимодействия твердых тел.

На рис. 4 показаны в программной среде ANSYS/AUTODYN фрагменты оценки кинетики возникновения и распространения эквивалентных напряжений в теле и гибридном натурном элементе обшивки КА, представляющем собой конструкцию из последовательно расположенных двух слоев стеклопластика и армирующего слоя из алюминиевого сплава.

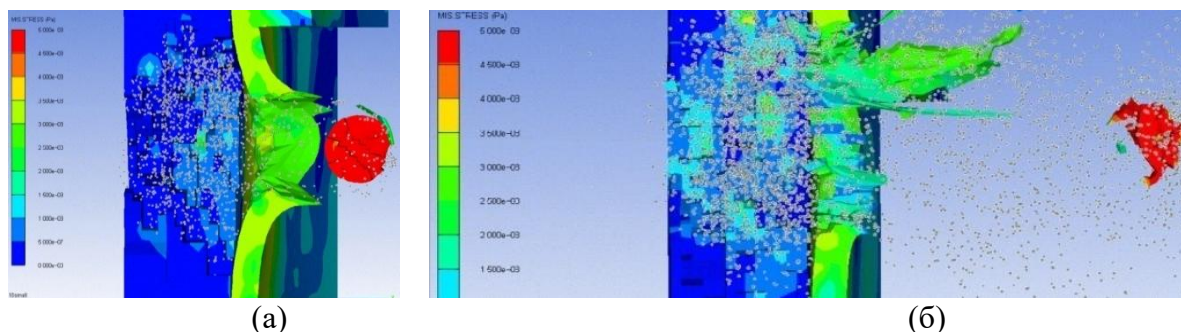


Рис. 4. Кинетика возникновения и распространения эквивалентных напряжений в теле из сплава ШХ15 и элементе КА при скоростях взаимодействия $V = 1\,465$ м/с (а) и $V = 2\,961$ м/с (б) [4]

При возрастании скорости удара АЧ, моделируемой сферическим телом из сплава ШХ15, максимальные эквивалентные напряжения в ударяющем теле достигают 5 000 МПа, что в 2...3 раза превышает прочность сплава ШХ15 (см. рис. 4а). В результате происходит интенсивное разрушение тела со второго слоя стеклопластика путем дробления и образования облака с большим количеством осколков. Этот процесс интенсифицируется по мере ужесточения параметров взаимодействия (например, с увеличением скорости взаимодействия) (см. рис. 4б). При этом возникают температурные поля, которые изменяются в зависимости от параметров взаимодействия. Так, максимальная температура тела может достигать 700 °С и подниматься выше. Анализ результатов показал, что температурный фактор оказывает существенное влияние на деформирование и разрушение тела [4].

Полученные результаты, в которых учтены особенности сложных физических процессов, протекающих при соударении АЧ с КА, позволяющие прогнозировать повреждения КА в зависимости от изменения материала, размеров и скорости АЧ, обеспечивают возможность накопления достоверных данных о последствиях ударов АЧ по КА (эта информация может уточняться и дополняться новой).

Компьютерное моделирование дает возможность формировать расширенный набор данных для прецедентов, результаты которых могут быть проверены в ходе расчетно-экспериментального моделирования и специальных натурных экспериментов. В совокупности это позволяет перейти к созданию рабочей выборки, необходимой для построения интеллектуальной системы управления защитой перспективных КА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод оценки различий между результатами натурального и вычислительного экспериментов, основанный на использовании аппарата нечеткой логики и нечетких множеств, а также оригинальная процедура перехода к индексной шкале при формировании общей оценки различий для множества точек соответствующих изображений. Применение аппарата нечеткой логики позволяет формировать обобщающие высказывания с оценкой результатов моделирования,

перейти от структур данных к структурам знаний, то есть к интеллектуальным технологиям изучения результатов экспериментов и построения рабочей выборки. Эти результаты могут быть использованы для составления теоретических и прикладных основ построения интеллектуальной системы управления защитой перспективных КА от ударов АЧ.

В программной среде ANSYS была разработана верифицированная компьютерная модель для оценки параметров зоны динамического взаимодействия твердых тел. Эта модель может быть использована для изучения фундаментальных основ динамического взаимодействия тел, а также для оценки и прогнозирования последствий динамического воздействия частиц в диапазоне скоростей и масс, недоступных в экспериментах, и проектирования перспективных систем защиты различных объектов, в том числе КА.

Разработанная технология значительно расширяет объем результатов расчетно-экспериментального моделирования и натуральных экспериментов по структуре и результатам взаимодействия твердых тел, протекающих при различных условиях, необходимых для построения рабочей выборки данных, используемых для построения интеллектуальных систем управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Paliukh B.V., Meshkov V.V., Kemaykin V.K., Kozlova Yu.G. Fundamentals of Intelligent System for Estimation of Dynamical Interaction of Space Debris with Spacecrafts // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017. V. 658. P. 248–257.
2. Paliukh B.V., Kemaykin V.K., Kozlova Yu.G., Kozhukhin I.V. Forecasting of Results of Dynamic Interaction Between Space Debris and Spacecrafts on the Basis of Soft Computing Methods // *Proceedings of the Third International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (ITI'18)*. 2019. P. 293–302.
3. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел / под ред. А.В. Герасимова. Томск: Издательство Томского университета. 2007. 572 с.
4. Мешков В.В., Филатова Н.Н., Федосов Ю.А. Компьютерное моделирование для интеллектуальной оценки динамического взаимодействия твердых тел // *Программные продукты и системы*. 2022. Т. 35. № 3. С. 444–451.
5. Schonberg W.P. Studies of Hypervelocity Impact Phenomena as Applied to the Protection of Spacecraft Operating in the MMOD Environment // *Procedia Engineering*. 2017. V. 204. P. 4–42.
6. Smirnov N.N., Kiselev A.B., Kondratyev K.A., Zolkin S.N. Impact of Debris Particles on Space Structures Modeling // *Acta Astronautica*. 2010. V. 67. № 3. P. 333–343.
7. Meshkov V.V., Fedosov Yu.A., Filatova N.N. An Integrated System for Modeling Hypervelocity Interaction of Solids // *Acta Astronautica*. 2021. V. 178. P. 606–615.
8. ANSYS LS-DYNA User's Guide. 2009. 200 p. URL: https://bajatutor.net/wp-content/uploads/2017/04/ans_lsd.pdf (дата обращения: 07.08.2022).
9. LS-DYNA. Theory Manual / compiled by J.O. Hallquist. California. 2006. 680 p. URL: https://www.oasys-software.com/dyna/wp-content/uploads/2018/02/ls-dyna_theory_manual_2006.pdf (дата обращения: 07.08.2022).
10. Zimmermann H.-J. Fuzzy Set Theory and Its Applications. Kluwer: Dordrecht. 1991. 315 p.
11. Amza C.G., Cacic D.T. Industrial Image Processing Using Fuzzy-Logic // *Procedia Engineering*. 2015. V. 100. P. 492–498.

12. Миловидов А.А., Филатова Н.Н. Программный комплекс для лингвистической интерпретации графических зависимостей с нечеткими координатами // *Программные продукты и системы*. 2011. № 3 (95). С. 110–114.

13. Kaufman L., Rousseeuw P.J. *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*. New York: Wiley. 1990. 355 p.

14. Everitt B.S., Landau S., Leese M. *Cluster Analysis*. London: Arnold Oxford University Press. 2001. 357 p.

15. Пен Р. Планирование эксперимента. Реализация в среде Statgraphics. Лондон: LAP Lambert Academic Publishing. 2011. 268 с.

Для цитирования: Мешков В.В., Филатова Н.Н., Кемайкин В.К. Формирование рабочей выборки для интеллектуальной системы управления с использованием результатов экспериментальных исследований и компьютерного моделирования // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 1 (17). С. 103–111.

FORMATION OF A TRAINING SAMPLE FOR AN INTELLIGENT CONTROL SYSTEM USING THE RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH AND COMPUTER MODELING

V.V. MESHKOV, Dr. Sc., N.N. FILATOVA, Dr. Sc.,
V.K. KEMAYKIN, Cand. Sc.

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

A concept is proposed and an algorithm is developed for the joint cluster analysis of the results of X-ray and optical studies and the results of modeling the dynamic interaction of bodies. A verified computer model for estimating the zone of dynamic interaction of solids is proposed. The results of modeling the hypersonic impact of anthropogenic particles on model samples and full-scale elements of the hybrid shell of the spacecraft are discussed.

Keywords: intelligent system, precedent, cluster analysis, verification, computer modeling, working sample.

Поступила в редакцию/received: 13.09.2022; после рецензирования/revised: 03.10.2022;
принята/accepted: 25.10.2022

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Технические науки»

**Научный рецензируемый журнал
№ 1 (17), 2023**

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

Редактор Ю.А. Якушева
Корректор Ю.Ф. Воробьева

Подписано в печать 10.02.2023

Дата выхода в свет 13.09.2023

Формат 60 x 84/8

Физ. печ. л. 14

Тираж 500 экз.

Цена свободная

Усл. печ. л. 13,02

Заказ № 325

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 12,18

С – 112

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета

Вестник Тверского государственного технического университета.

Серия «Технические науки». № 1 (17), 2023

170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22
Отпечатано в ООО «Наукоемкие технологии»
Центр инженерной печати
170024, Тверь, ул. Академическая, д. 14