

Инженерные Технологии



№1 2023

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№1, 2023

ENGINEERING TECHNOLOGIES

SCIENTIFIC AND PRACTICAL JOURNAL

№1, 2023

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

Попов Василий Николаевич

Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия)

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

БИТЮКОВ ВИТАЛИЙ КСЕНОФОНОВИЧ

Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия)

ГУСЕВ БОРИС ВЛАДИМИРОВИЧ

Российский университет транспорта (МИИТ) (Москва, Россия)

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ:

ЩЕРБАКОВА МАРГАРИТА СЕРГЕЕВНА

Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

ТИХОМИРОВ СЕРГЕЙ GERMAHOVIЧ

Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия)

БИТЮКОВ ВЛАДИМИР КСЕНОФОНОВИЧ

Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия)

АЛТАЙУЛЫ САГЫМБЕК АЛТАЙУЛЫ

Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина (Астана, Казахстан)

БУРЛУЦКАЯ МАРИЯ ШАУКАТОВНА

Воронежский государственный университет (Воронеж, Россия)

ДВОРЕЦКИЙ СТАНИСЛАВ ИВАНОВИЧ

Тамбовский государственный технический университет (Тамбов, Россия)

ЗИЯТДИНОВ НАДИР НИЗАМОВИЧ

Казанский национальный исследовательский технологический университет (Казань, Россия)

КАРПОВИЧ ДМИТРИЙ СЕМЕНОВИЧ

Белорусский государственный технологический университет (Минск, Беларусь)

КОЛОДЕЖНОВ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина" (Воронеж, Россия)

КУЩЕВ СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина" (Воронеж, Россия)

ЛАБУТИН АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ

Ивановский государственный химико-технологический университет (Иваново, Россия)

МИЩЕНКО СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

Тамбовский государственный технический университет (Тамбов, Россия)

МУРОМЦЕВ ДМИТРИЙ ЮРЬЕВИЧ

Тамбовский государственный технический университет (Тамбов, Россия)

ПРОВоторов Вячеслав Васильевич

Воронежский государственный университет (Воронеж, Россия)

ТРОСТЯНСКИЙ СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина" (Воронеж, Россия)

УРБАНОВИЧ ПАВЕЛ ПАВЛОВИЧ

Белорусский государственный технологический университет (Минск, Россия)

ХВОСТОВ АНАТОЛИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

Воронежский государственный технический университет (Воронеж, Россия)

ВАСИЛЕНКО ВИТАЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ
Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия)

ПОДВАЛЬНЫЙ СЕМЕН ЛЕОНИДОВИЧ
Воронежский государственный технический университет (Воронеж, Россия)

ОСТРИКОВ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ
Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия)

СКРЫПНИКОВ АЛЕКСЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ
Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия)

ХАУСТОВ ИГОРЬ АНАТОЛЬЕВИЧ
Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия)

ЧЕРТОВ ЕВГЕНИЙ ДМИТРИЕВИЧ
Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия)

ДВОРЕЦКИЙ ДМИТРИЙ СТАНИСЛАВОВИЧ
Тамбовский государственный технический университет (Тамбов, Россия)

КАРМАНОВА ОЛЬГА ВИКТОРОВНА
Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия)

БЛАГОВЕЩЕНСКАЯ МАРГАРИТА МИХАЙЛОВНА
Московский государственный университет пищевых производств (Москва, Россия)

КОЛЫБАНОВ КИРИЛЛ ЮРЬЕВИЧ
МИРЭА-Российский технологический университет (Москва, Россия)

МАТВЕЙКИН ВАЛЕРИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ
Тамбовский государственный технический университет (Тамбов, Россия)

МЕНЬШУТИНА НАТАЛЬЯ ВАСИЛЬЕВНА
Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева (Москва, Россия)

МЕШАЛКИН ВАЛЕРИЙ ПАВЛОВИЧ
Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева (Москва, Россия)

ЧЕЛНОКОВ ВИТАЛИЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ
Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева (Москва, Россия)

БОРЕЙКО НАТАЛЬЯ ПАВЛОВНА
Научно-исследовательский институт синтетического каучука им. С.В. Лебедева (Санкт-Петербург, Россия)

ВАНИЕВ МАРАТ АБДУРАХМАНОВИЧ
Волгоградский государственный технический университет (Волгоград, Россия)

ЛЮСОВА ЛЮДМИЛА РОМУАЛЬДОВНА
МИРЭА-Российский технологический университет (Москва, Россия)

МОКШИНА НАДЕЖДА ЯКОВЛЕВНА
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина" (Воронеж, Россия)

ПРОКОПЧУК НИКОЛАЙ РОМАНОВИЧ
Белорусский государственный технологический университет (Минск, Беларусь)

РУДАКОВ ОЛЕГ БОРИСОВИЧ
Воронежский государственный технический университет (Воронеж, Россия)

СОКОЛОВА МАРИНА ДМИТРИЕВНА
ФИЦ "Якутский научный центр СО РАН" (Якутск, Россия)

КУЧМЕНКО ТАТЬЯНА АНАТОЛЬЕВНА
Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия)

ПУГАЧЕВА ИННА НИКОЛАЕВНА
Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия)

СУХАНОВ ПАВЕЛ ТИХОНОВИЧ
Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия)

Ответственный секретарь: Щербакова М. С. (эл. почта: engtech@vsuet.ru)

Учредитель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций: Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-83079 от 07 апреля 2022 г.

Адрес университета, редакции, издательства и отдела полиграфии ФГБОУ ВО «ВГУИТ»

394036, Воронеж, пр. Революции д.19 ауд.445

Контактный тел.+7 (960) 122-87-46

E-mail: engtech@vsuet.ru

Подписано в печать 10.04.2023.

Формат 210 x 297 1/16

Усл. печ. л. 10,75. Тираж 100 экз. Заказ №

Цена - свободная

© ФГБОУ ВО

«Воронеж. гос. ун-т инж.

технол.», 2023

Editor-in-chief

POPOV VASILIJ NIKOLAEVICH

Voronezh state university of engineering technologies (Voronezh, Russia)

Deputy editors- in - chief

BITJUKOV VITALIJ KSENOFONTOVICH

Voronezh state university of engineering technologies (Voronezh, Russia)

GUSEV BORIS VLADIMIROVICH

Russian university of transport (MIIT) (Moscow, Russia)

Executive secretary

SHHERBAKOVA MARGARITA SERGEEVNA

Voronezh state university of engineering technologies (Voronezh, Russia)

Editorial board

TIHOMIROV SERGEJ GERMANOVICH

Voronezh state university of engineering technologies (Voronezh, Russia)

BITJUKOV VLADIMIR KSENOFONTOVICH

Voronezh state university of engineering technologies (Voronezh, Russia)

ALTAJULY SAGYMBEK ALTAJULY

Kazakh Agro-Technical Research University (Astana, Republic of Kazakhstan)

BURLUCKAJA MARIJA SHAUKATOVNA

Voronezh State University (Voronezh, Russia)

DVORECKIJ STANISLAV IVANOVICH

Tambov State Technical University (Tambov, Russia)

ZIJATDINOV NADIR NIZAMOVICH

Kazan National Research Technological University (Kazan, Russia)

KARPOVICH DMITRIJ SEMENOVICH

Belarusian State Technological University (Minsk, Republic of Belarus)

KOLODEZHNOV VLADIMIR NIKOLAEVICH

Military Training and Research Center of the Air Force "Air Force Academy named after Prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin (Voronezh, Russia)

KUSHCHEV SERGEY SERGEEVICH

Military Training and Research Center of the Air Force "Air Force Academy named after Prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin" (Voronezh, Russia)

LABUTIN ALEXANDER NIKOLAEVICH

Ivanovo State University of Chemistry and Technology (Ivanovo, Russia)

MISHCHENKO SERGEY VLADIMIROVICH

Tambov State Technical University (Tambov, Russia)

MUROMTSEV DMITRY YURIEVICH

Tambov State Technical University (Tambov, Russia)

PROVOTOROV VYACHESLAV VASILYEVICH

Voronezh State University (Voronezh, Russia)

TROSTYANSKY SERGEY NIKOLAEVICH

Military Training and Research Center of the Air Force "Air Force Academy named after Prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin" (Voronezh, Russia)

URBANOVICH PAVEL PAVLOVICH

Belarusian State Technological University (Minsk, Republic of Belarus)

KHVOSTOV ANATOLY ANATOLYEVICH

Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia)

VASILENKO VITALY NIKOLAEVICH
Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia)

PODVALNYI SEMYON LEONIDOVICH
Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia)

OSTRIKOV ALEXANDER NIKOLAEVICH
Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia)

SKRYPNIKOV ALEXEY VASILYEVICH
Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia)

HAUSTOV IGOR ANATOLYEVICH
Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia)

CHERTOV EVGENY DMITRIEVICH
Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia)

DVORETSKII DMITRY STANISLAVOVICH
Tambov State Technical University (Tambov, Russia)

KARMANOVA OLGA VIKTOROVNA
Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia)

BLAGOVESHCHENSKAIA MARGARITA MIKHAILOVNA
Moscow State University of Food Production (Moscow, Russia)

KOLYBANOV KIRILL YURIEVICH
MIREA-Russian Technological University (Moscow, Russia)

MATVEIKIN VALERY GRIGORYEVICH
Tambov State Technical University (Tambov, Russia)

MENSHUTINA NATALIA VASILYEVNA
D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology (Moscow, Russia)

MESHALKIN VALERY PAVLOVICH
D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology (Moscow, Russia)

CHELNOKOV VITALY VYACHESLAVOVICH
D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology (Moscow, Russia)

BOREYKO NATALIA PAVLOVNA
Research Institute of Synthetic Rubber named after S.V. Lebedev (St. Petersburg, Russia)

VANIEV MARAT ABDURAKHMANOVICH
Volgograd State Technical University (Volgograd, Russia)

LYUSOVA LYUDMILA ROMUALDOVNA
MIREA-Russian Technological University (Moscow, Russia)

MOKSHINA NADEZHDA YAKOVLEVNA
Military Training and Research Center of the Air Force "Air Force Academy named after Prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin" (Voronezh, Russia)

PROKOPCHUK NIKOLAY ROMANOVICH
Belarusian State Technological University (Minsk, Russia)

RUDAKOV OLEG BORISOVICH
Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia)

SOKOLOVA MARINA DMITRIEVNA
FITC "Yakut Scientific Center SB RAS" (Yakutsk, Russia)

KUCHMENKO TATIANA ANATOLYEVNA
Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia)

PUGACHEVA INNA NIKOLAEVNA
Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia)

SUKHANOV PAVEL TIKHONOVICH
Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia)

Executive Secretary: Shcherbakova M. S. (e-mail: engtech@vsuet.ru)

Founder: Voronezh State University of Engineering Technologies

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technologies and Mass Communications: Certificate of Registration PI No. FS77-83079 dated April 07, 2022.

The address of the University, the editorial office, the publishing house and the printing department of VSUIT:

394036, Voronezh, Revolution Ave., room 445

Contact tel.+7 (960) 122-87-46

E-mail: engtech@vsuet.ru

Signed to the press on 10.04.2023.

Format 210 x 297 1/16

Usl. pech. l. 10,75. Edition of 100 copies. Order No.

Price - free

© FSBEI HE

«Voronezh State University of
Engineering and Technology»,
2023

СОДЕРЖАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДИССИПАТИВНОГО НАГРЕВА ВЯЗКОУПРУГОГО ЭЛАСТОМЕРА В ЩЕЛЕВОМ ЗАЗОРЕ С ДВИЖУЩИМИСЯ СТЕНКАМИ <i>А.А. Хвостов, С.Г. Тихомиров, А.П. Попов, В.К. Битюков, И.А. Хаустов</i>	15
ПРИМЕНЕНИЕ 3D ТЕХНОЛОГИЙ В ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ МЕНЕДЖМЕНТА ПРОИЗВОДСТВА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ <i>П.М. Полякова, В.В. Челноков, Ю.М. Аверина, Н.А. Рудакова</i>	23
СИНТЕЗ РОБАСТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С МАКСИМАЛЬНОЙ СТЕПЕНЬЮ УСТОЙЧИВОСТИ <i>Ю.П. Барметов</i>	28
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ЦИКЛИЧЕСКИХ АДсорбЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ И МЕТОДЫ ЕЕ РЕШЕНИЯ <i>С.И. Дворецкий, Д.С. Дворецкий, Е.И. Акулинин, В.Б. Усачёв, В.А. Беляев</i>	35
ОБ ОПТИМАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ ЗАПАСАМИ ТОРГОВОГО ПРЕДПРИЯТИЯ <i>Д.А. Коковкин</i>	45
ВВЕДЕНИЕ ЭТАПА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ В НЕЙРОСЕТЕВЫЕ АЛГОРИТМЫ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ СИСТЕМ МОБИЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ <i>А.В. Пономарев, А.В. Богословский, И.В. Жигулина, Н.А. Пономарев</i>	50
АНИЗОТРОПНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ БЛИЗКОРАСПОЛОЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ <i>М.А. Пантюхин, А.В. Богословский, И.В. Жигулина, Е.С. Легостаева</i>	63
ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ В НЕЧЕТКИХ УСЛОВИЯХ <i>В.В. Боровик, П.М. Смирнова</i>	72
ВЫБОР ПОДВИЖНОЙ ФАЗЫ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ АНЕСТЕТИКОВ МЕТОДОМ ХРОМАТОГРАФИИ В ТОНКОМ СЛОЕ <i>Н.Ю. Санникова, П.Т. Суханов, Т.В. Чибисова</i>	77

CONTENTS

SIMULATION OF THE DISSIPATIVE HEATING DYNAMICS OF A VISCOELASTIC ELASTOMER IN A SLOT GAP WITH MOVING WALLS <i>A. A. Khvostov, S. G. Tikhomirov, A. P. Popov, V. K. Bityukov, I. A. Haustov</i>	15
APPLICATION OF 3D TECHNOLOGIES IN INTEGRATED POLYMER MATERIALS PRODUCTION MANAGEMENT SYSTEMS <i>P.M. Poliakova, V.V. Chelnokov, Y.M. Averina, N.A. Rudakova</i>	23
SYNTHESIS OF A ROBUST CONTROL SYSTEM WITH A MAXIMUM DEGREE OF STABILITY <i>Y. P. Barmetov</i>	28
THE PROBLEM OF PRESSURE SWING ADSORPTION GAS MIXTURES SEPARATION PROCESSES OPTIMIZATION UNDER UNCERTAINTY <i>S. I. Dvoretzky, D. S. Dvoretzky, E. I. Akulinin, V. B. Usachev, V.A. Belyaev</i>	35
PRINCIPLES OF TRAJECTORY CONTINUATION IN THE INVENTORY MANAGEMENT SYSTEM OF INDUSTRIAL ENTERPRISES <i>D.A.Kokovkin</i>	45
INTRODUCING THE STAGE OF PRELIMINARY DETECTION OF VIDEO INFORMATION INTO NEURAL NETWORK ALGORITHMS TO REDUCE THE COMPUTATION LOAD OF MOBILE OBJECT SYSTEMS <i>A.V. Ponomarev, A.V. Bogoslovsky, I.V. Zhigulina, N. A. Ponomarev</i>	50
ANISOTROPIC FILTERING OF NEARBY OBJECT IN IMAGES <i>M.A. Pantyukhin, A.V. Bogoslovsky, I.V. Zhigulina, E.S. Legostaeva</i>	63
DECISION-MAKING IN FUZZY CONDITIONS <i>V.V.Borovik, P.M. Smirnova</i>	72
THE CHOICE OF THE MOBILE PHASE IN THE DETERMINATION OF ANESTHETICS BY CHROMATOGRAPHY IN A THIN LAYER <i>N.Yu. Sannikova, P.T. Sukhanov, T.V. Chibisova</i>	77

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДИССИПАТИВНОГО НАГРЕВА ВЯЗКОУПРУГОГО ЭЛАСТОМЕРА В ЩЕЛЕВОМ ЗАЗОРЕ С ДВИЖУЩИМИСЯ СТЕНКАМИ

Хвостов А. А.	1	 0000-0002-3836-9407	khvtol1974@yandex.ru
Тихомиров С. Г.	2	 0000-0002-8192-0049	tikhomirov_57@mail.ru
Попов А. П.	2	 0000-0002-1875-0868	aleksej_p_91@mail.ru
Битюков В. К.	2	 0000-0002-8897-5763	kaf-ius@vsuet.ru
Хаустов И. А.	2	 0000-0002-8897-5763	haustov_ia@mail.ru

¹Воронежский государственный технический университет, ул. Плехановская, д.11., г. Воронеж, 394018, Россия, кафедра Прикладной математики и механики

²Воронежский государственный университет инженерных технологий, проспект Революции, д.19., г. Воронеж, 394036, Россия, кафедра Информационных и управляющих систем

Аннотация: рассмотрена полусопряженная задача математического моделирования процесса диссипативного нагрева эластомера в процессе его термомеханической обработки в межроторном зазоре нагреваемой камеры пластикодера Брабендер PLV-151. Поля скоростей рассчитаны для стационарного режима, а тепловая задача решалась в динамике с использованием идентифицированного стационарного поля скоростей сдвига. Разработана математическая модель неизотермического течения эластомера в щелевом зазоре с движущимися стенками. Процесс моделирования проводился в рамках допущений, согласно которым, девиатор тензора напряжений рассмотрен в виде суммы вязкой и вязкоупругой составляющей, а тензор вязкоупругих напряжений имеет несколько мод и математически представлен в соответствии с правилом линейной суперпозиции. В качестве реологической модели, описывающей нелинейную составляющую процесса деформации, использовалась модель Гизекуса. Результаты компьютерного моделирования показали, что время переходного процесса стабилизации поля скоростей в несколько раз меньше, чем аналогичный показатель процесса стабилизации температурного поля. При этом максимальные значения напряжения возникают в центре обрабатываемого образца при увеличении частоты вращения. Установлено, что имеет место незначительная неравномерность нагрева эластомера за счёт диссипации механической энергии, а динамика процесса повышения температуры включает в себя две области: квазилинейный участок с примерно постоянной скоростью нагрева; участок, характеризующийся снижением скорости нагрева до значений, близких к нулю. Проведенные на ЭВМ расчеты и результаты сопоставления их результатов с экспериментальными данными показали, что до достижения определенной частоты вращения и времени обработки температура изменяется линейно во времени и её значение через заданное время обработки пропорционально квадрату скорости движения стенки. Получена зависимость температуры образцов, предварительно обработанных ионизирующим излучением от интенсивности механической обработки. Предложенная модель позволяет качественно и количественно описывать динамику температуры изделия в ходе термомеханической обработки в заданном диапазоне режимных параметров, что позволяет в дальнейшем использовать её как математический инструмент для оценки величин управляющих воздействий данного технологического процесса.

Ключевые слова: термомеханическая обработка, пластикация эластомеров, диссипативный нагрев, математическое моделирование, вязкоупругость, модель Гизекуса.

SIMULATION OF THE DISSIPATIVE HEATING DYNAMICS OF A VISCOELASTIC ELASTOMER IN A SLOT GAP WITH MOVING WALLS

Khvostov A. A.	1	 0000-0002-3836-9407	khvtol1974@yandex.ru
Tikhomirov S. G.	2	 0000-0002-8192-0049	tikhomirov_57@mail.ru
Popov A. P.	2	 0000-0002-1875-0868	aleksej_p_91@mail.ru
Bityukov V. K.	2	 0000-0002-8897-5763	kaf-ius@vsuet.ru
Haustov I. A.	2	 0000-0002-8897-5763	haustov_ia@mail.ru

¹Voronezh State Technical University, st. Plekhanovskaya, 11, Voronezh, 394018, Russia, Department of Applied Mathematics and Mechanics

²Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue, 19, Voronezh, 394036, Russia, Department of Information and Control Systems

Abstract: considers a semi-adjoint problem of mathematical modeling of the process of dissipative heating of the elastomer during its thermomechanical processing in the inter-rotor (inter-roll) gap of a special heated Brabender chamber. The velocity fields are calculated for the stationary regime, and the thermal problem was solved in dynamics, using the identified stationary shear velocity field. A mathematical model of a non-isothermal flow of an elastomer in a slotted gap with moving walls has been developed. The modeling process was carried out under the assumptions that the stress

tensor deviator is considered as the sum of the viscous and viscoelastic components, and the viscoelastic stress tensor has several modes and is mathematically represented in accordance with the linear superposition rule. The Giesekus model was used as a rheological model describing the nonlinear component of the deformation process. To analyze the dynamics of heating and the effect of the linear velocity of wall rotation on its intensity, we used the calculation of the temperature averaged over the area of the gap. The results of computer simulation showed that the time of the transient stabilization of the velocity field is several times less than that of the process of stabilization of the temperature field. In this case, the maximum stress values occur in the center of the processed sample with an increase in the rotational speed. It has been established that there is a slight uneven heating of the elastomer due to the dissipation of mechanical energy, and the dynamics of the process of temperature increase includes two areas: a quasi-linear section with an approximately constant heating rate, and a section characterized by a decrease in the heating rate to near-zero values. The calculations carried out on the computer and the results of comparing their results with experimental data showed that until a certain rotational speed and processing time are reached, the temperature changes linearly in time and its value after a given processing time is proportional to the square of the wall motion velocity. The dependence of the temperature of processed samples, previously subjected to ionization radiation, on the intensity of mechanical treatment is obtained. The proposed model makes it possible to qualitatively and quantitatively correctly describe the temperature dynamics of the product during thermomechanical processing in a given range of operating parameters, which allows it to be further used as a mathematical tool for estimating the magnitude of the control actions of a given technological process.

Key words: thermomechanical treatment, plasticization of elastomers, dissipative heating, mathematical modeling, viscoelasticity, Giesekus model.

ВВЕДЕНИЕ

Пластикация и гомогенизация эластомеров является одним из этапов переработки эластомеров, в том числе регенератов, полученных отработанных резин и резинотехнических изделий. Для пластикации и гомогенизации измельченных и очищенных отходов широкое применение нашли специальное оборудование: роторные смесители закрытого типа, экструдеры и др. [1]. При использовании оборудования роторного типа подготовленный исходный материал помещается в нагреваемую камеру, где с помощью роторов специальной формы происходит его термо-механическая обработка, пластикация и гомогенизация. В ряде случаев в оборудовании предусмотрена возможность регулирования скорости, температуры и зазоров между элементами роторов, при которых происходит процесс пластикации и гомогенизации.

Для оценки перерабатываемости эластомеров широко применяется пластикордер PLV-151 фирмы Брабендер, который представляет собой управляемый микропроцессором крутильный пластометр, непрерывно фиксирующий изменение крутящего момента на валу роторов и температуру материала в испытательной камере. Он моделирует резино-смеситель закрытого и позволяет исследовать процессы пластикации каучуков и приготовления резиновых смесей [2].

При пластикации эластомеров в технологических машинах смешения возникают существенные напряжения, приводящие к тепловой диссипации механической энергии и нагреву эластомера [3]. При расчёте технологического оборудования и соответствующи-

щих режимов его работы необходимо прогнозировать степень нагрева эластомера, чтобы более точно подбирать температурный режим обработки, а также предотвратить её возгорание. Для этого необходима математическая модель, описывающая сопряжённые процессы тепломассопереноса в эластомере в ходе его деформации, учитывающие основные технологические параметры: температуру загружаемого в смеситель сырья, скорость деформации и величину зазора между вращающимися роторами.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Ввиду сложности геометрии, для упрощения расчётов необходимо выделить представительный элемент ротора, позволяющий прогнозировать динамику температуры в зазоре без значительного усложнения расчётной области. Наиболее интенсивная деформация возникает в межроторном зазоре, где обеспечивается минимальное расстояние между элементами ротора, развивается максимальная относительная скорость, что приводит к развитию максимальных нормальных и касательных напряжений в образце (рис. 1а).

Ввиду значительной разницы в механических напряженных состояниях в межроторном зазоре и остальной области камеры смесителя, вкладом в диссипационные механизмы вне зоны межроторного зазора можно пренебречь. Учитывая постоянство геометрии расчётной области вдоль оси вращения, а также пренебрегая тепловой инерционностью и кривизной рабочих плоскостей роторов, упростим расчётную область до нормального оси ротора сечения (рис. 1б) и рас-

смотрим течение в плоскощелевом канале. При этом на вертикальных границах будем рассматривать движущуюся прямолинейную стенку.

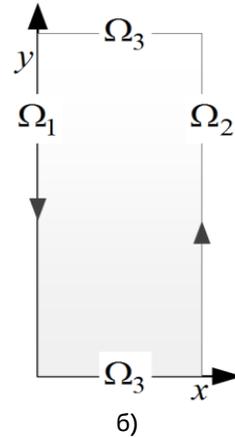
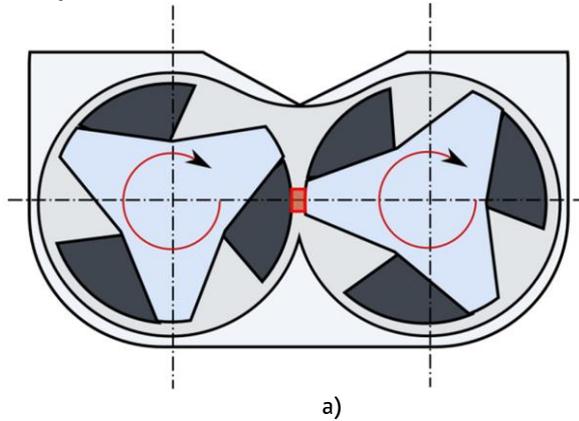


Рис. 1 Схема механических напряжений

Ввиду высокой вязкости среды режим движения среды принимается ламинарный. Действием массовых сил пренебрегаем. Считаем, что среда несжимаема. Предварительный вычислительный эксперимент показал, что переходный процесс стабилизации поля скоростей происходит за время в несколько раз меньшее, чем время стабилизации температурного поля. Ввиду этого рассмотрена полусопряженная задача – поля скоростей рассчитаны для стационарного режима, а тепловая задача решалась в динамике, с использованием идентифицированного стационарного поля скоростей u .

С учетом сделанных допущений основные уравнения сохранения импульса, массы и энергии запишутся как [4].

$$\begin{cases} \rho u \cdot \nabla u = \nabla \cdot (-PI + \tau) \\ \rho c_p \frac{\delta T}{\delta t} + \rho c_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot k \nabla T + Q_{vd}, \\ \rho \nabla \cdot u = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где ρ – плотность эластомера; u – вектор скорости м/с; P – избыточное давление, Па; I – единичный тензор; T – температура, К; c_p – удельная изобарная теплоемкость эластомера, Дж/(кг·К); k – коэффициент теплопроводности Вт/(м·К); τ – тензор напряжений, Па.

Тепло, выделяющееся при деформации эластомера, описывается зависимостью:

$$Q_{vd} = \tau : \nabla u. \quad (2)$$

Эластомер представляет собой вязкоупругую среду, для описания которой необходимо использовать соответствующую реологическую модель тензора напряжений. Кроме того, следует учитывать наличие больших деформаций, приводящих к нелинейности связи напряжение – деформация.

Таким образом, предлагается математическая модель неизотермического течения эластомера в щелевом зазоре с движущимися стенками.

Для вязкоупругой среды девиатор тензора напряжений представляется в виде суммы вязкой и вязкоупругой или упругой составляющей

$$\tau = 2\mu_s S + T_e, \quad (3)$$

где μ_s – вязкость растворителя, S – тензор скоростей деформации

$$S = \frac{1}{2} \nabla u + (\nabla u)^T, \quad (4)$$

где T_e – тензор вязкоупругих или упругих напряжений.

Для сложных реологических сред с несколькими релаксационными механизмами тензор вязкоупругих или упругих напряжений может иметь несколько мод. В простейшем случае представляется линейной суперпозицией:

$$T_e = \sum_m T_{e_m}, \quad (4)$$

где m – номер релаксационного механизма.

Для замыкания (1-3) использовано определяющее уравнение переноса для m -го релаксационного механизма в виде

$$\frac{1}{2\mu_{e_m}} f_{r_m}(T_e) + \frac{\lambda_{e_m}}{2\mu_{e_m}} T_e = f_{p_m}(T_e) S, \quad (5)$$

где f_{r_m} – релаксационная функция, f_{p_m} – функция фактора вязкости, зависящая от реологической модели вязкоупругости, λ_{e_m} – время релаксации, μ_{e_m} – вязкость полимера.

Конвективная производная определяется как сумма субстанциональной производной и деформационного слагаемого, возникающего при больших деформациях [5]

$$T = \frac{\partial T}{\partial t} + (\nabla u)T - [(\nabla u)T + T(\nabla u)^T]. \quad (6)$$

Ввиду больших деформаций образца, для учёта нелинейности будем использовать в качестве реологической модели модель Гизе-

куса [6], для которой функции релаксации и фактора вязкости определяются как:

$$f_{r_m} = \left(1 + \alpha_{em} \frac{\lambda_{em}}{\mu_{em}} T_{em}\right) T_{em}, f_{p_m} = 1, \quad (7)$$

где α_{em} – безразмерный фактор подвижности.

Система уравнений (1-7) дополнена начальными условиями: $u=0, P=0, T=T_0$, где T_0 – начальная температура среды.

Граничные условия для расчетной области (рисунок 1):

1) Граница Ω_1 : движущаяся стенка и тепловое граничное условие первого рода: $u = -U_{main_rol}t$, где U_{main_rol} – модуль окружной скорости роторов; t – тангенциальный единичный направляющий вектор; $T = T_{main_rol}$; где T_{main_rol} – температура стенки.

2) Граница Ω_2 : движущаяся стенка и тепловое граничное условие первого рода: $u = U_{main_rol}t$, где U_{main_rol} – модуль окружной скорости роторов; t – тангенциальный единичный направляющий вектор; $T = T_{main_rol}$; где T_{main_rol} – температура стенки.

3) Ω_3 : вход-выход среды в расчётную область – нулевое избыточно давление, обеспечивающее движение среды в обе стороны

за счёт перепада давлений на границе и условие теплоизоляции: $P=0; \frac{\partial T}{\partial n}=0$,

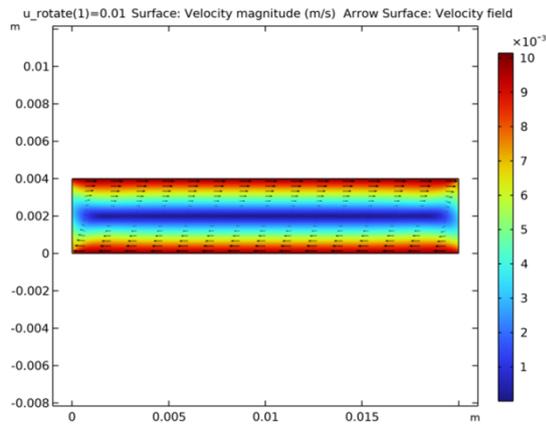
где n – вектор нормали к соответствующей границе расчетной области.

Для обеспечения согласованности начальных и граничных условий на границах среды и роторов при решении нестационарной тепловой задачи проведено сопряжение умножением модуля скорости стенки на сглаженную функцию Хэвисайда на основе логистической функции, обеспечивающую сопряжение начальных и граничных условий в течение 0,2 секунд [6]:

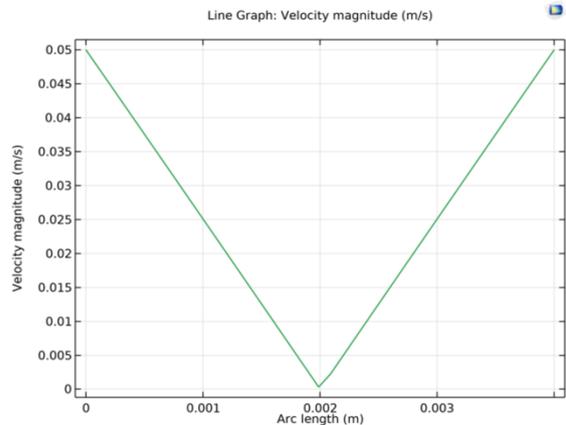
$$\tilde{\theta}(t) = \theta_{Up} + \frac{\theta_{Low} - \theta_{Up}}{1 + e^{-2s(t-t^*)}}, \quad (8)$$

где $\theta_{Low}, \theta_{Up}$ – верхнее и нижнее значения функции, s – характеристика ширины транзитного перехода, t^* – время транзитного перехода.

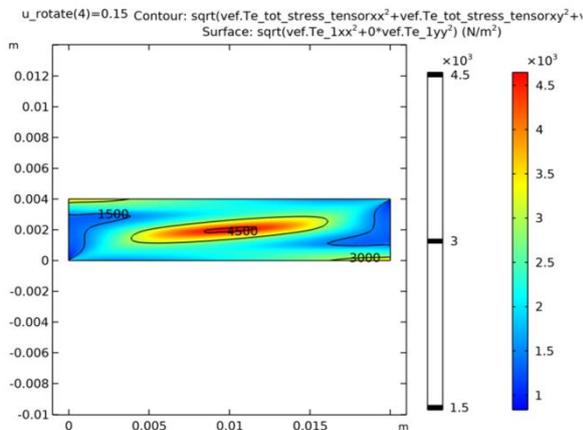
Вычислительный эксперимент проводился при следующих условиях: размеры области 20 мм × 4 мм; эластомер с одним релаксационным механизмом с параметрами $\mu_s - 0.3 \text{ Па}\cdot\text{с}$; $\mu_{em} - 8 \text{ Па}\cdot\text{с}$; $\lambda_{em} - 0.05 \text{ с}$; $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$.



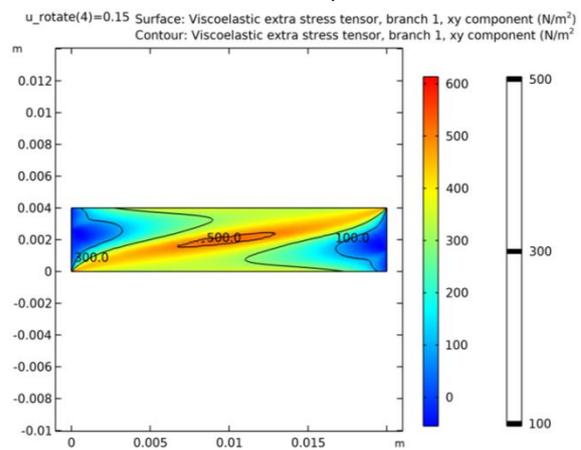
а)



б)



в)



г)

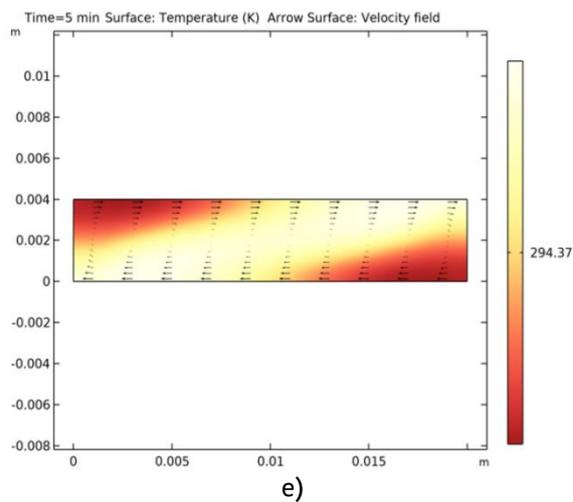
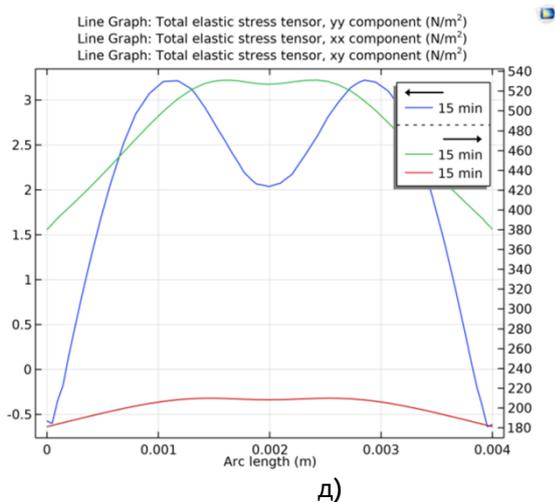


Рис. 2 Результаты моделирования

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов вычислительного эксперимента показал, что поле скоростей (рис. 2а) с ростом частоты вращения практически не меняет свою структуру. Имеется тенденция к небольшой асимметрии поля относительно осевой линии при увеличении скорости движения стенки. Профиль модуля скорости (рис. 2б), вычисленный на нормали к осевой линии, имеет практически линейную форму с минимумом на оси симметрии. Графики модуля суммы нормальных компонентов тензора напряжений (рис. 2в), а также касательных напряжений (рис. 2г) показывают рост напряжений при увеличении частоты вращения, при этом максимальные значения напряжения возникают в центре. Как видно из рис. 2д, касательные напряжения вдоль оси x на два порядка выше нормальных, что говорит об их основном вкладе в деформацию эластомера. Как видно из рис. 2е, в ходе нагрева массы обрабатываемого образца в

зазоре за счёт диссипации механической энергии формируется практически однородное температурное поле, имеющее небольшое (на уровне $1/100$ К) увеличение температуры в зоне максимальной концентрации напряжений. Проведенное исследование даёт возможность полагать незначительной неравномерность нагрева полимера в зазоре и пренебречь ей в ходе дальнейших расчётов.

Для анализа динамики нагрева и влияние на его интенсивность линейной скорости стенки введем расчёт осреднённой по площади зазора температуры:

$$\bar{T} = \frac{1}{S} \int_{\Omega} T(x, y) dx dy, \quad (9)$$

где S – площадь расчётной области зазора.

Результаты вычислительного эксперимента (рис. 3) показали, что изменение температуры происходит квазилинейно с постоянной скоростью, которая увеличивается вместе со скоростью движения стенки (рис. 3а).

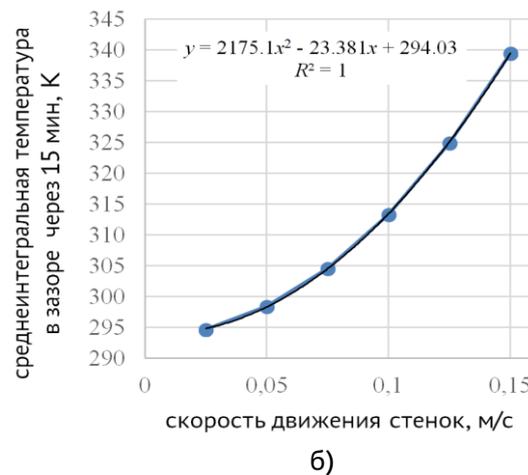
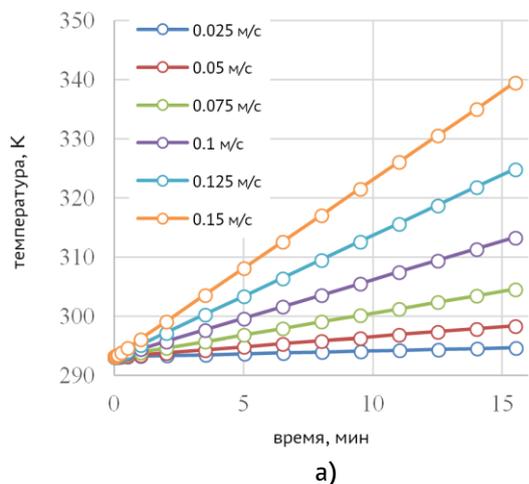


Рис. 3 Изменение осреднённой температуры эластомера (а), среднеинтегральная температура в зазоре через 15 мин, К (б).

Как видно из рисунка 3б с ростом скорости движения стенки происходит нелинейный рост осреднённой по площади температуры в зазоре через заданное время обработки (в данном случае 15 минут). Экспериментальные данные хорошо описываются квадратичной зависимостью, из чего можно сделать вывод, что при заданных допущениях температура полимера в щелевом зазоре пропорциональна квадрату скорости движения стенки.

Полученные результаты носят качественный характер и для их верификации

проведены натурные эксперименты на образцах с использованием пластикордера Брабендер. Образцы эластомеров представляли собой радиационные регенераты, полученные из отработанных резин на основе бутилкаучука облучением ускоренными электронами при поглощенной дозе 50 кГр.

На рис. 4 представлены результаты натурального эксперимента для трех образцов, обработанных в камере пластикодера в течение 20 минут при 60 °С и частотах вращения роторов 45, 60 и 75 об/мин.

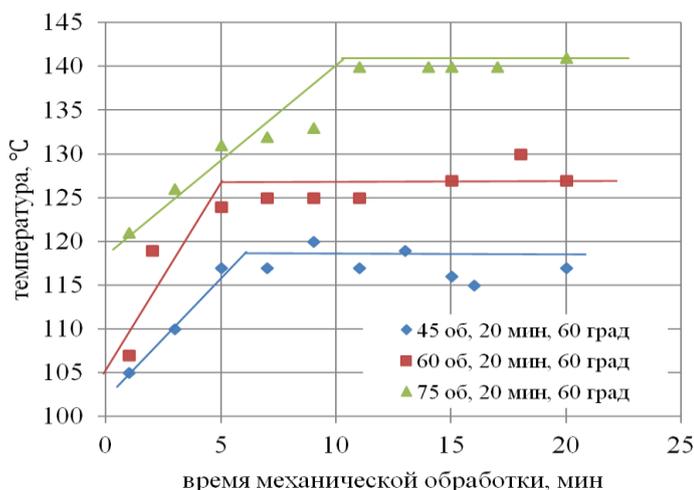


Рис. 4 Динамика нагрева эластомера в зазоре

Как видно из представленных данных, динамика нагрева включает в себя два участка:

- квазилинейный участок с практически постоянной скоростью нагрева (0 до 5-10 минут), который обусловлен процессами диссипации механической энергии в тепловую, что соответствует допущению, принятому в модели о стационарности полей скорости и напряжений (в этом случае слагаемое $Q = \tau \cdot \dot{\gamma}$ в уравнении сохранения энергии (1) при установившихся полях скорости и постоянной вязкости является константой);

- снижение скорости нагрева до околонулевых значений после 5-10 минут обработки, говорящее о снижении создаваемых напряжений вследствие уменьшения вязкости, вызванное как нагревом полимера, так и его пластикацией и разрушением пространственной структуры, что приводит к уменьшению нормальных и касательных напряжений при сохраняющемся режиме деформации (эти явления в математической модели не учтены).

Смещение этих зон в сторону увеличения времени перехода к нулевой скорости роста температуры обратно пропорционально

частоте вращения роторов, за исключением режима 75 об/мин, что вероятно вызвано резким нагревом и разрушением структуры с соответствующим снижением вязкости эластомера в начальные моменты времени при больших частотах, что также снижает динамику нагрева и не учитывается в математической модели.

На рис. 5 представлена зависимость температуры образцов, облученных в течение 5, 10 и 15 минут, измеренной после 5-ти минут механической обработки в зависимости от частоты вращения роторов.

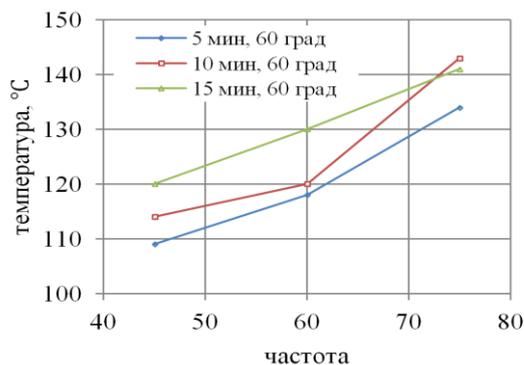


Рис. 5 Графики изменения температуры

Как видно из рис. 5 изменение температуры в зависимости от частоты подтверждает предсказанный на основе математической модели (1-8) эффект нелинейной (близкой к параболической) зависимости температуры полимера от частоты вращения роторов, который пропадает после определенного времени обработки вследствие разрушения структуры и разогрева полимера.

ВЫВОДЫ

Таким образом, экспериментальные данные подтверждают результаты математического моделирования. Проведенные исследования и их сопоставление с данными натурального эксперимента показали, что до достижения определенной частоты вращения и времени обработки температура изменяется линейно во времени и её значение через заданное время обработки пропорционально

квадрату скорости движения стенки. При этом поле температур является практически однородным, что позволяет не учитывать распределение температуры в математической модели динамики изменения вязкости в ходе процесса термомеханодеструкции.

Математическая модель (1-8) позволяет качественно и количественно описывать динамику температуры эластомера в ходе механической обработки в заданном диапазоне режимных параметров. Однако для учета механизма разрушения структуры и вызванное этим снижение вязкости, необходимо дополнительно ввести в структуру математической модели зависимость вязкости эластомера от времени механической обработки. Это позволит учесть снижение механических напряжений и соответствующее снижение интенсивности диссипативного нагрева.

ЛИТЕРАТУРА

1. Переработка каучуков и резиновых смесей / Е.Г. Вострокнутов, М.И. Новиков, В.И. Новиков, Н.В. Прозоровская. – Москва:НТЦ «НИИШП», 2005.– 369 с. – Текст: непосредственный.
2. Аверко-Антонович И.Ю., Бикмуллин Р.Т. Методы исследования структуры и свойств полимеров. - Казань: КГТУ, 2002. - 604 с. – Текст: непосредственный.
3. Барамбойм, Н.К. Механохимия высокомолекулярных соединений. / Н.К. Барамбойм.– Москва: Химия, 1978. – 384 с. –Текст: непосредственный.
4. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа: Учеб. Для вузов. – 7 изд./ Л.Г. Лойцянский. – Москва: Дрофа, 2003.–840 с. – Текст: непосредственный.
5. Matolcsi, Tamás; Ván, Péter (2008). "On the Objectivity of Time Derivatives". *Atti della Accademia Peloritana dei Pericolanti - Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali* (1): 1–13.
6. Giesekus, H. A unified approach to a variety of constitutive models for polymerfluids based on the concept of configuration-dependent molecular mobility / H. Giesekus. – Текст: непосредственный // *Rheol. Acta* 21, 366 (1982).
7. Kanwal, R.P. *Generalized Functions: Theory and Technique*, 2nd ed. Boston, MA: Birkhäuser, 1998.– С. 251. – Текст: непосредственный.

REFERENCES

1. Processing of rubbers and rubber mixtures / E.G. Vostroknutov, M.I. Novikov, V.I. Novikov, N.V. Prozorovskaya. – Moscow:NTC "NIISHP", 2005. - 369 p. (in Russia)
2. Averko-Antonovich I.Yu., Bikmullin R.T. Methods of studying the structure and properties of polymers. - Kazan: KSTU, 2002. - 604 p. (in Russia)
3. Baramboim, N.K. Mechanochemistry of high-molecular compounds. / N.K. Baramboim.– Moscow: Chemistry, 1978. - 384 p. (in Russia)
4. Loitsyansky, L.G. Mechanics of liquid and gas: Textbook. For universities. - 7th ed./ L.G. Loitsyansky. – Moscow: Bustard, 2003. – 840 p. (in Russia)
5. Matolcsi, Tamás; Ván, Péter (2008). "On the Objectivity of Time Derivatives". *Atti della Accademia Peloritana dei Pericolanti - Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali* (1): 1–13.
6. Giesekus, H. A unified approach to a variety of constitutive models for polymerfluids based on the concept of configuration-dependent molecular mobility / H. Giesekus.
7. Kanwal, R.P. *Generalized Functions: Theory and Technique*, 2nd ed. Boston, MA: Birkhäuser, 1998.– С. 251.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, ORCID, Email)
Хвостов А.А.	д.т.н., профессор,  0000-0002-3836-9407 , khvtol1974@yandex.ru
Тихомиров С.Г.	д.т.н., профессор,  0000-0002-8192-0049 , tikhomirov_57@mail.ru
Попов А.П.	к.т.н., доцент,  0000-0002-1875-0868 , aleksej_p_91@mail.ru
Битюков В.К.	д.т.н., профессор,  0000-0002-8897-5763 , kaf-ius@vsuet.ru
Хаустов И.А.	д.т.н., профессор,  0000-0002-8897-5763 , haustov_ia@mail.ru

AUTHORS INFORMATION

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, ORCID, Email)
Khvostov A.A.	DSc, Professor,  0000-0002-3836-9407 , khvtol1974@yandex.ru
Tikhomirov S.G.	DSc, Professor,  0000-0002-8192-0049 , tikhomirov_57@mail.ru
Popov A.P.	PhD, Assistant professor,  0000-0002-1875-0868 , aleksej_p_91@mail.ru
Bityukov V.K.	DSc, Professor,  0000-0002-8897-5763 , kaf-ius@vsuet.ru
Haustov I.A.	DSc, Professor,  http://orcid.org/0000-0002-8897-5763 , haustov_ia@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ 3D ТЕХНОЛОГИЙ В ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ МЕНЕДЖМЕНТА ПРОИЗВОДСТВА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Полякова П.М.	1	-	polina-polyar@mail.ru
Челноков В.В.	1	 0000-0002-8192-0049	2961168@inbox.ru
Аверина Ю.М.	1	 0000-0002-1875-0868	averina.i.m@muctr.ru
Рудакова Н.А.	1	-	natali.ruda.kova@mail.ru

¹Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Миусская площадь, дом 9, Москва, 12504, Россия, кафедра цифровой инженерии и информационных технологий

Аннотация: обсуждается актуальная для современного общества и химической промышленности проблема – внедрение интегрированной системы менеджмента в производства полимерных материалов с использованием инновационных технологий, на примере 3D технологий, позволяющих смоделировать производственные процессы, построить модели материалов, а также, провести виртуальные испытания образцов композиционных материалов. Сформулирована важность внедрения интегрированной системы менеджмента на предприятиях по производству полимеров, для обеспечения преимуществ среди конкурентов и устойчивого развития. Одновременное внедрение стандартов системы качества (ISO 9001), стандартов экологического менеджмента (ISO 14001) и охраны здоровья и безопасности труда (ISO 45001) обеспечивают все преимущества такой объединенной системы и позволяют получить синергетический усиленный результат эффективной деятельности принятых мероприятий. Помимо положительных сторон, существуют серьезные препятствия на пути внедрения интегрированной системы менеджмента, которые заключаются в наличии существенных различий в положениях этих стандартов. Использование 3D технологий при производстве полимерных изделий позволяет комплексно подойти к решению задач, удовлетворяющим требованиям всех трех стандартов интегрированной системы менеджмента. В настоящее время создаются специальные программные обеспечения для работы на промышленных предприятиях, позволяющие с помощью исходных данных по материалу установить его структуру после переработки и свойства, исходя из структуры, не затрачивая на это материальных ресурсов. На основе доступной информации об интегрированных системах менеджмента были сделаны выводы о целесообразности их внедрения на предприятия по производству полимеров. Реализация внедрения интегрированной системы менеджмента при одновременном применении 3D технологий позволит предприятиям по производству полимерных материалов придерживаться ESG политики и принципов устойчивого развития, а также приблизит производства к осуществлению быстрого импортозамещения отечественными материалами.

Ключевые слова: интегрированная система менеджмента, 3D технологии, менеджмент качества, система охраны труда, экологическая система.

APPLICATION OF 3D TECHNOLOGIES IN INTEGRATED POLYMER MATERIALS PRODUCTION MANAGEMENT SYSTEMS

Poliakova P.M.	1	-	polina-polyar@mail.ru
Chelnokov V.V.	1	 0000-0002-8192-0049	2961168@inbox.ru
Averina Y.M.	1	 0000-0002-1875-0868	averina.i.m@muctr.ru
Rudakova N.A.	1	-	natali.ruda.kova@mail.ru

¹Russian University of Chemical Technology DI. Mendeleev, Miuskaya Square, 9, Moscow, 12504, Russia, Department of Digital Engineering and Information Technology

Abstract discusses an urgent problem for modern society and the chemical industry – the introduction of an integrated management system in the production of polymer materials using innovative technologies, using 3D technologies as an example, allowing to simulate production processes, build models of materials, as well as conduct virtual tests of composite materials samples. The importance of the introduction of an integrated management system at polymer production enterprises to ensure advantages among competitors and sustainable development is formulated. Simultaneous implementation of quality system standards (ISO 9001), environmental management standards (ISO 14001) and occupational health and safety (ISO 45001) provide all the advantages of such a unified system and allow to obtain a synergistic enhanced result of the effective activities of the measures taken. In addition to the positive aspects, there are serious obstacles to the implementation of an integrated management system, which consist in the presence of significant differences in the provisions of these standards. The use of 3D technologies in the production of polymer products allows a comprehensive approach to solving problems that meet the requirements of all three standards of the integrated management system. Currently, special software is being created for work at industrial enterprises, allowing using the initial data on the material to establish its structure after processing and properties, based on the structure, without

spending material resources on it. Based on the available information about integrated management systems, conclusions were drawn about the feasibility of their implementation at polymer production enterprises. The implementation of an integrated management system with the simultaneous use of 3D technologies will allow enterprises producing polymer materials to adhere to ESG policies and principles of sustainable development, and will also bring production closer to the implementation of rapid import substitution with domestic materials.

Keywords: *integrated management system, 3D technologies, quality management, labor protection system, environmental system.*

Внедрение интегрированных систем менеджмента на российские производства набирает все большую популярность, что позволяет обеспечить на предприятиях высокий уровень качества, выпускаемой продукции, надежность и безопасность производства. Интегрированная система менеджмента включает в себя несколько систем менеджмента, функционирующих как единое целое, при этом позволяя устранить противоречия и дублирования в общей системе управления предприятием [1]. Чаще всего при внедрении интегрированной системы менеджмента используют стандарты систем менеджмента качества (ISO серии 9000:2000), охраны окружающей среды (ISO серии 14000) и охраны труда (ISO 45001) [2]. Количество потребляемых изделий из полимеров с каждым годом только возрастает, что означает рост химический предприятий по производству пластиков как во всем мире, так и в России. Для сохранения конкурентных преимуществ на производствах вводят интегрированную систему менеджмента. При внедрении системы менеджмента качества решаются основные проблемы по выбору материалов и определении качеств готовых изделий из пластмасс. На данный момент самым эффективным методом решения данной задачи является применение 3D технологий в моделировании процессов производства, построении модели материала, испытаниях образцов, прочностных и тепловых расчетах.

При написании данной статьи были проанализированы научные работы других авторов по темам аддитивных технологий и интегрированных систем менеджмента, информация взята из открытых источников о производствах, использующих 3D технологии.

Под интегрированной системой менеджмента стоит подразумевать часть системы общего менеджмента, отвечающую требованиям двух или более международных стандартов и функционирующую как единое целое [3]. Интегрирование систем менеджмента стоит рассматривать как предпосылку для устойчивого развития организации, так как использование стандартов в организационной прак-

тике способствует повышению качества таких процессов, как жизненного цикла продукции, социальных процессов, производительности и безопасности труда, эффективности природоохранной деятельности и рационального использования природных ресурсов.

При внедрении интегрированной системы менеджмента на предприятия по производству полимерных материалов используют стандарты систем менеджмента качества (ISO серии 9000:2000), охраны окружающей среды (ISO серии 14000) и охраны труда (ISO 45001).

Стандарты систем менеджмента качества (ISO серии 9000:2000) призваны осуществлять [4]:

- определение потребностей и ожиданий потребителей и других заинтересованных сторон;
- разработку политики и целей организации в области качества;
- определение процессов и ответственности, необходимых для достижения целей в области качества;
- определение и выделение ресурсов, необходимых для достижения целей в области качества;
- разработку методов для измерения результативности и эффективности каждого процесса;
- определение способов предупреждения несоответствий и устранения их причин;
- разработку и применение процесса для постоянного улучшения системы менеджмента качества.

Экологический менеджмент может создать возможности для содействия устойчивому развитию посредством:

- защиты окружающей среды путем предотвращения или смягчения неблагоприятных экологических воздействий;
- смягчение потенциально неблагоприятного воздействия условий окружающей среды на организацию;
- улучшение экологических результатов деятельности;
- управление или влияние на методы проектирования, производства, поставки, потреб-

ления и утилизации продукции и услуг организации с применением концепции жизненного цикла, что может предотвратить экологическое воздействие при случайном отклонении на каком-либо этапе цикла;

- достижение финансовых и операционных преимуществ, которые могут быть результатом внедрения экологически значимых решений, направленных на укрепление позиции организации на рынке;
- доведение до соответствующих заинтересованных сторон экологической информации [5].

Целью и ожидаемыми результатами системы менеджмента охраны здоровья и обеспечения безопасности труда являются предотвращение травм и ущерба для здоровья сотрудников, а также обеспечение безопасных, в плане здоровья и условий труда, рабочих мест; соответственно, крайне важно для организации исключить или минимизировать риски в области охраны здоровья и обеспечения безопасности труда за счет принятия результативных предупреждающих и защитных мер [6].

Использование 3D технологий позволяет комплексно подойти к решению задач удовлетворяющим требованиям всех трех стандартов. В настоящее время создаются специальные программные обеспечения, позволяющие с помощью исходных данных по материалу установить структуру после переработки и свойства, исходя из структуры, не затрачивая при этом материальных ресурсов.

При проектировании изделий из полимерных композиционных материалов специалисту необходимо выполнить многокритериальный поиск и анализ возможных вариантов конструкторско-технологического исполнения изделия. Данный этап занимает наибольшую долю процесса разработки и может нести в себе большие риски для всех дальнейших процессов проектирования [7]. Основными недостатками данной стадии процесса являются: высокий риск возникновения ошибок на ранних стадиях; увеличение сроков проектирования за счет анализа большого числа вариантов; увеличение стоимости проектирования при допущении ошибки. Данные недостатки усиливаются, так как на предприятиях, отсутствует интегрированная автоматизированная среда, которая позволила бы объединить участников процесса проектирования и предоставить им единую информационную базу для быстрого принятия решений и для накопления новых знаний [8].

Для устранения приведенных выше проблем существуют специальные программные комплексы, позволяющие разрабатывать композиционные материалы и производить виртуальные испытания, а также моделировать изготовление и расчет композиционных деталей. Корпорация MSC Software предлагает программный комплекс для многоуровневого моделирования многофазных материалов – Digimat (Digital Materials) [9]. В качестве исходных характеристик выступают свойства, топология и объемное/массовое содержание каждой фазы, а также микроструктура композиционного материала. На основании этих данных происходит построение математической модели материала на микроуровне, что позволяет модели быть чувствительной к свойствам каждой фазы, а также определяются требуемые механические, тепловые и электрические характеристики материала на основе композита. Таким образом, интегрированная система менеджмента с легкостью может отслеживать качество выпускаемого продукта и ориентировать его свойства на удовлетворение потребительских нужд, кроме того позволит создать единую базу знаний для предупреждения возникновения массового брака изделий [10].

Особенности при проектировании композиционных материалов, которые необходимо учитывать: гетерогенность материалов, нелинейность свойств, сложный механизм разрушения, зависимость микроструктуры материала от выбранной технологии и параметров изготовления материала. При этом для уменьшения натуральных испытаний, которые несут в себе большие материальные и временные затраты применяется специализированный модуль – Digimat-VA [9], позволяющий провести испытания образцов виртуально и автоматически получить расчетные характеристики с учетом разброса свойств материала, что повлияет на интегрированную систему менеджмента, в частности на экологический менеджмент, путем снижения финансовых затрат на проведение испытаний и утилизацию отходов.

Создание единой базы данных на предприятии позволит сотрудникам быстрее принимать решения по разработке и вводить новых сотрудников в курс дела [11]. Digimat-MX [9] представляет собой базу для хранения, защиты и безопасного обмена данными о композиционных материалах. Также возможностью данного модуля является проведение обратного инжиниринга, для этого в систему необходимо ввести данные о микро-

уровне материала и результаты натуральных испытаний, при этом модуль определяет параметры модели материала с минимальным отклонением от натуральных испытаний. Данная система позволяет обеспечить сотрудников информацией о ранее произведенных экспериментах, а также заносить все испытания образцов композиционных материалов, которые будут доступны всем сотрудникам предприятия, задействованных на разных этапах разработки и производства.

Ключевым современным трендом для всех предприятий, не только для производств полимерных материалов, является внедрение интегрированной системы менеджмента, которая будет одновременно управлять системой менеджмента качества, охраной окружающей среды и охраной труда. При внедрении необходимо придерживаться современных технологий, значительно упрощающих адаптацию к новшествам, такую как использование 3D технологий. Существующие программные обеспечения позволяют добиваться наилучших результатов в процессе проекти-

рования композиционных материалов без использования большого количества натуральных испытаний. При использовании модуля Digimat-VA испытания образцов производятся виртуально, что позволяет уменьшить предприятию негативное воздействие на окружающую среду с помощью минимизации выбросов отходов. Единая база данных, представленная модулем Digimat-MX, позволяет хранить и безопасно обмениваться данными о полученных результатах экспериментов на производстве, что способствует сокращению времени разработки новых композиционных материалов, а также уменьшает длительность проектных работ на предприятии.

Реализация внедрения интегрированной системы менеджмента с применением 3D технологий позволит предприятиям по производству полимерных материалов придерживаться ESG политики и принципов устойчивого развития, а также приблизит производства к осуществлению быстрого импортозамещения отечественными материалами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трошин, В. Н. Интегрированные системы менеджмента / В.Н. Трошин. – Текст: непосредственный // Стандарты и качество. – 2002. – № 11. – С. 10–13.
2. Свиткин, М. З. Практические аспекты создания ИСМ / М.З. Свиткин. – Текст: непосредственный // Методы менеджмента качества. – 2007. – № 5. – С. 24–30.
3. Голубенко, О.А. Что такое интегрированная система менеджмента (ИСМ)? / О.А. Голубенко, Е.Н. Поглазова. – Текст: непосредственный // Международный научный журнал «Символ науки». – 2017. – № 4–2. – С. 65–68.
4. ГОСТ Р ИСО 9000–2001. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь: государственный стандарт Российской Федерации: дата введения 2001-08-31 / Федеральное агентство по техническому регулированию. Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2004. – 33 с. – Текст: непосредственный.
5. ГОСТ Р ИСО 14000–01. Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2017-03-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2017. – 12 с. – Текст: непосредственный.
6. ГОСТ Р ИСО 45001– 01. Системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья. Требования и руководство по применению: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2021-04-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2021. – 40 с. – Текст: непосредственный.
7. Яблочников, Е.И. Интегрированная система для разработки изделий из полимерных композиционных материалов на основе методологии PLM/ Е.И. Яблочников, А.С. Восоркин, А.В. Цупиков. – Текст: непосредственный // Программные продукты и системы. – 2014. – № 2. – С. 100 – 104.
8. Яблочников, Интегрированные технологии проектирования изделий из полимерных композиционных материалов / Е.И. Яблочников, С.Д. Васильков, Ю.Н. Фомина. – Текст: непосредственный // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – Том 78. – № 2. – С. 109–113
9. Демкович, Н.А. Многоуровневое моделирование композиционных материалов и конструкций на их основе с помощью DIGIMAT/ Н.А. Демкович. – Текст: непосредственный // Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники. – 2015. – № 2. – С. 15–30.

10. Политков, К.А. Проблемы и перспективы развития аддитивных технологий в России / К.А. Политов. – Текст: непосредственный // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации. – 2020.–№19.–С. 221–222
11. Перспективы внедрения аддитивных технологий на предприятия машиностроения в условиях цифровизации экономики / Е.Е. Кононова, А.А. Муравьева, Н.С. Маркова, О.А. Грачева. – Текст: непосредственный // Материалы II Всероссийской научно-практической конференции (24-25 октября 2019 г., Орел) – Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2019.–С. 275-278.3

REFERENCES

1. Troshin, V.N. Integrated management systems / V.N. Toroshin//Standards and quality. - 2002. – No11. -P. 10–13.(in Russian)
2. Svitkin, M. Z. Practical aspects of creating IMS / M.Z. Svitkin // Methods of quality management. - 2007. – No 5. – P. 24–30.(in Russian)
3. Golubenko, O.A. What is an Integrated Management System (IMS)? / O.A. Golubenko, E.N. Poglazov // International scientific journal "Symbol of Science". - 2017. –No 4–2. –P. 65–68.(in Russian)
4. GOST R ISO 9000 - 2001. Quality management systems. Basic provisions and vocabulary: state standard of the Russian Federation: introduction date 2001-08-31 / Federal Agency for Technical Regulation. Ed. official. - Moscow: Standartinform, 2004. – 33 p. (in Russian)
5. GOST R ISO 14000 - 01. Environmental management systems. Requirements and guidance for use: national standard of the Russian Federation: introduction date 2017-03-01 / Federal Agency for Technical Regulation. Ed. official. - Moscow: Standartinform, 2017. -12 p. (in Russian)
6. GOST R ISO 45001-01. Occupational safety and health management systems. Requirements and guidance for use: national standard of the Russian Federation: introduction date 2021-04-01 / Federal Agency for Technical Regulation. Ed. Official.–Moscow: Standartinform, 2021. –40 p.(in Russian)
7. Yablochnikov, E.I. Integrated system for the development of products from polymer composite materials based on the PLM methodology / E.I. Yablochnikov, A.S. Vosorkin, A.V. Tsupikov// Software products and systems. - 2014.–No2. –P. 100 – 104. (in Russian)
8. Yablochnikov, Integrated technologies for designing products from polymer composite materials / E.I. Yablochnikov, S.D. Vasilkov, Yu.N. Fomin// Scientific and technical. vestn. inform. technologies, mechanics and optics. –2012. – Vol. 78. – No 2. – P. 109–113. (in Russian)
9. Demkovich, N.A. Multilevel modeling of composite materials and structures based on them using DIGIMAT / N.A. Demkovich // Materials and technologies of a new generation for advanced products of aviation and space technology.–2015. - No 2. - P. 15–30.(in Russian)
10. Politkov, K.A. Problems and prospects of development of additive technologies in Russia / K.A. Politov. – Text: direct // Youth. Society. Modern science, technology and innovation. – 2020.–No.19.–pp. 221-222 (in Russian)
11. Prospects for the introduction of additive technologies at engineering enterprises in the context of digitalization of the economy / E.E. Kononova, A.A. Muravieva, N.S. Markova, O.A. Grachev // Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference (October 24-25, 2019, Orel). - Eagle: OSU named after I.S. Turgenev, 2019. – P. 275–278. (in Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, ORCID, Email)
Полякова П.М.	polina-polyar@mail.ru
Челноков В.В.	д.т.н., профессор,  0000-0002-8192-0049 , 2961168@inbox.ru
Аверина Ю.М.	к.т.н., доцент,  0000-0002-1875-0868 , averina.i.m@muctr.ru
Рудакова Н.А.	natali.ruda.kova@mail.ru

AUTHORS INFORMATION

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, ORCID, Email)
Polyakova P.M.	polina-polyar@mail.ru
Chelnokov V.V.	DSc, Professor,  0000-0002-8192-0049 , 2961168@inbox.ru
Averina Yu.M.	PhD, Assistant professor,  0000-0002-1875-0868 , averina.i.m@muctr.ru
Rudakova N.A.	natali.ruda.kova@mail.ru

УДК. 681.5.013

СИНТЕЗ РОБАСТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С МАКСИМАЛЬНОЙ СТЕПЕНЬЮ УСТОЙЧИВОСТИ

Барметов Ю.П.¹  [0000-0002-3836-9407](https://orcid.org/0000-0002-3836-9407) barmetovu@mail.ru

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий, проспект Революции, д.19., г. Воронеж, 394036, Россия, кафедра Информационных и управляющих систем

Аннотация рассматривается задача определения области изменения коэффициентов ПИД-регулятора, обеспечивающих максимально возможную степень устойчивости робастной замкнутой системы управления с интервально заданным объектом 3 – 5 порядков при отсутствии нулей в числителе передаточной функции. Решение задачи ищется на основе метода *D*-разбиений на плоскости двух коэффициентов регулятора с использованием в характеристическом уравнении замкнутой системы комплексной переменной, действительной частью которой является степень устойчивости, взятая со знаком минус, а мнимой – круговая частота. Полученные из комплексного характеристического уравнения выражения для граничных кривых *D*-областей коэффициентов регулятора и особых линий для нулевой частоты, позволили провести анализ поведения границ при точечных коэффициентах объекта в зависимости от изменения задаваемой степени устойчивости и третьего коэффициента регулятора. Показаны два случая поведения границ при достижении максимальной степени устойчивости. *D*-область вырождается либо в линию, дважды пересекающую особую линию в одной точке, либо в точку соприкосновения особой линии и граничной кривой, касательная к которой в точке соприкосновения совпадает с особой линией. Эти свойства границ *D*-областей позволили записать уравнения и найти выражение для максимальной степени устойчивости системы с объектом 3 порядка и численные решения для систем с объектами 4, 5 порядков. Для замкнутой системы с интервально заданным объектом сформулировано условие существования робастной степени устойчивости: общая для всех характеристических полиномов область коэффициентов регулятора, обеспечивающих заданную степень устойчивости системы, будет существовать, когда для любой границы *D*-области, соответствующей определенному характеристическому полиному, конечная точка её пересечения с верхней особой линией будет находиться правее всех начальных точек пересечения граничных кривых с этой особой линией. Если при этом, хотя бы одна начальная и конечная точки пересечения совпадают, степень устойчивости будет максимально возможной.

Ключевые слова: система управления, регулятор, коэффициенты, степень устойчивости, *D*-разбиения.

SYNTHESIS OF A ROBUST CONTROL SYSTEM WITH A MAXIMUM DEGREE OF STABILITY

Barmetov Y. P.¹  [0000-0002-3836-9407](https://orcid.org/0000-0002-3836-9407) barmetovu@mail.ru

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue, 19, Voronezh, 394036, Russia, Department of Information and Control Systems

Abstract: discusses the problem of determining the area of variation of the coefficients of the PID controller, providing the maximum possible degree of stability of a robust closed control system with an interval-defined object of 3-5 orders in the absence of zeros in the numerator of the transfer function, is considered. The solution of the problem is sought on the basis of the method of *D*-partitions on the plane of two coefficients of the regulator using a closed system of a complex variable in the characteristic equation, the real part of which is the degree of stability taken with a minus sign, and the imaginary one is the circular frequency. The expressions obtained from the complex characteristic equation for the boundary curves of the *D*-regions of the regulator coefficients and special lines for zero frequency allowed us to analyze the behavior of the boundaries at the point coefficients of the object depending on the change in the specified degree of stability and the third coefficient of the regulator. Two cases of the behavior of boundaries when the maximum degree of stability is reached are shown. The *D*-region degenerates either into a line that crosses the special line twice at one point, or into the point of contact of the special line and the boundary curve, the tangent to which at the point of contact coincides with the special line. These properties of the boundaries of *D*-regions allowed us to write down equations and find an expression for the maximum degree of stability of a system with an object of 3 orders and numerical solutions for systems with objects of 4-5 orders. For a closed system with an interval-defined object, a condition for the existence of a robust degree of stability is formulated: a region of regulator coefficients common to all characteristic polynomials that provide a given degree of stability of the system will exist when for any boundary of the *D*-region corresponding to a certain characteristic polynomial, the end point of its intersection with the upper singular line will be to the right of all initial intersection points boundary curves with this special line. If at the same time, at least one starting and ending points of intersection coincide, the degree of stability will be the maximum possible.

Key words: control system, regulator, coefficients, degree of stability, *D*-partitions.

ВВЕДЕНИЕ

Задачи синтеза систем с заданной или максимальной степенью устойчивости решаются достаточно давно. Известно, что системы, синтезированные по этому критерию, обладают более высоким быстродействием, меньшим перерегулированием и большим запасом устойчивости [1-3]. Интерес к данному направлению усиливается с расширением сферы приложения робастных систем управления на объекты с недостаточно четким математическим описанием, в частности, на объекты с интервально заданными параметрами [4,5]. Проблема синтеза систем с максимальной степенью устойчивости рассматривается в цикле работ Шубладзе А.М. [2, 6, 8].

Основы предлагаемого метода. Решается задача определения коэффициентов ПИД-регулятора, обеспечивающих максимальную степень устойчивости замкнутой системы управления для объекта невысокого порядка с интервальными коэффициентами при отсутствии нулей в числителе передаточной функции. В качестве метода решения выбран достаточно наглядный метод D-разбиений, позволяющий выделять области изменения коэффициентов регулятора, обеспечивающих заданную степень устойчивости системы [9]. Решение рассматривается на примерах объектов третьего пятого порядков.

Так для объекта третьего порядка с передаточной функцией

$$W(s) = \frac{ko}{A_3 s^3 + A_2 s^2 + A_1 s + A_0}, \quad (1)$$

характеристический полином замкнутой системы с ПИД-регулятором имеет вид:

$$D(s, \mathbf{k}) = s \cdot (A_3 s^3 + A_2 s^2 + A_1 s + A_0) + ko \cdot (k_{\text{и}} + k_{\text{п}} s + k_{\text{д}} s^2), \quad (2)$$

где ko, A_0, A_1, A_2, A_3 - интервальные коэффициенты полинома; $k_{\text{и}}, k_{\text{п}}, k_{\text{д}}$ - коэффициенты интегральной, пропорциональной и дифференциальной составляющих регулятора, $\mathbf{k} = (k_{\text{и}} \ k_{\text{п}} \ k_{\text{д}})^T$ - вектор коэффициентов регулятора, s - переменная Лапласа.

Условие попадания корней характеристического уравнения замкнутой системы

$$D(s, \mathbf{k}) = 0 \quad (3)$$

на прямую $-\eta + j \cdot \omega$, проходящую на комплексной плоскости корней слева от мнимой оси на расстоянии η , равном требуемой степени устойчивости, запишется как

$D(-\eta + j\omega, \mathbf{k}) = 0$, где ω - круговая частота, $-\infty < \omega < \infty$; $j = \sqrt{-1}$.

Заменив в полиноме (2) s на $-\eta + j \cdot \omega$, разделив полученное выражение на действительную и мнимую части и приравняв обе части нулю получим систему уравнений для определения границ D-областей [10]:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}[D(-\eta + j\omega, \mathbf{k})] = & A_3 \eta^4 - 6\eta^2 A_3 \omega^2 + \\ & + A_3 \omega^4 - A_2 \eta^3 + 3A_2 \eta \omega^2 + A_1 \eta^2 - \\ & - A_1 \omega^2 - A_0 \eta + ko(k_{\text{и}} - k_{\text{п}} \eta + k_{\text{д}} \eta^2 - \\ & - k_{\text{д}} \omega^2) = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Im}[D(-\eta + j\omega, \mathbf{k})] = & \omega \left[-4A_3 \eta^3 + 4\eta A_3 \omega^2 + \right. \\ & + 3A_2 \eta^2 - A_2 \omega^2 - 2A_1 \eta + A_0 + \\ & \left. + ko(k_{\text{п}} - 2k_{\text{д}} \eta) \right] = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнение (5) справедливо в следующих случаях:

- 1) когда $\omega \neq 0$, а выражение в квадратных скобках равно нулю;
- 2) когда $\omega = 0$, а выражение в квадратных скобках не равно нулю;
- 3) когда $\omega = 0$ и выражение в квадратных скобках равно нулю.

Для случая $\omega \neq 0$ из равенства нулю выражения в квадратных скобках уравнения (5) находим $k_{\text{п}}$,

$$\begin{aligned} k_{\text{п}}(\omega, k_{\text{д}}, \eta, \mathbf{A}) = & 2k_{\text{д}} \eta - \frac{4\eta A_3 \omega^2 - A_2 \omega^2}{ko} + \\ & + \frac{4A_3 \eta^3 - 3A_2 \eta^2 + 2A_1 \eta - A_0}{ko}, \end{aligned} \quad (6)$$

а из уравнения (4) выражаем $k_{\text{и}}$:

$$\begin{aligned} k_{\text{и}}(\omega, k_{\text{д}}, \eta, \mathbf{A}) = & \eta \cdot k_{\text{п}}(\omega, k_{\text{д}}, \eta) - \\ & - \frac{A_3 \omega^4 - 6A_3 \eta^2 \omega^2 + 3A_2 \eta \omega^2 - A_1 \omega^2}{ko} - \\ & - \frac{A_3 \eta^4 - A_2 \eta^3 + A_1 \eta^2 - A_0 \eta}{ko} - \\ & - k_{\text{д}}(\eta^2 - \omega^2). \end{aligned} \quad (7)$$

Выражения (6), (7) определяют границы области коэффициентов интегральной ($k_{\text{и}}$) и пропорциональной ($k_{\text{п}}$) составляющих регулятора, с фиксированным количеством корней, имеющих действительную часть меньше $-\eta$. Коэффициент дифференциальной составляющей $k_{\text{д}}$, степень устойчивости η и частота

ω являются параметрами для $k_{и}(\omega, k_{д}, \eta, \mathbf{A})$, $k_{п}(\omega, k_{д}, \eta, \mathbf{A})$. Как видно, частота ω входит в правые части выражений (6), (7) в четной степени, поэтому значения $k_{п}$, $k_{и}$ для отрицательных частот совпадают со значениями для положительных частот и график D-границы проходит дважды по одному и тому же пути. В дальнейшем можно рассматривать только положительную область частот, изменяя ω от нуля.

При $\omega=0$ уравнение (5) выполняется для любых значений $k_{п}$, и уравнение (4) определяет особую прямую:

$$k_{и.о}(k_{д}, k_{п}, \eta, \mathbf{A}) = \eta \cdot k_{п} - k_{д} \eta^2 + \frac{-A_3 \eta^4 + A_2 \eta^3 - A_1 \eta^2 + A_0 \eta}{k_0} \quad (8)$$

Для третьего случая, когда $\omega=0$ и выражение в квадратных скобках уравнения (5) равно нулю, уравнения (6) и (7) определяют координаты точки соприкосновения граничной кривой D-области и особой прямой:

$$k_{п}(0, k_{д}, \eta, \mathbf{A}) = 2k_{д} \eta + \frac{4A_3 \eta^3 - 3A_2 \eta^2 + 2A_1 \eta - A_0}{k_0} \quad (9)$$

$$k_{и}(0, k_{д}, \eta, \mathbf{A}) = k_{д} \eta^2 + \eta^2 \cdot \frac{3A_3 \eta^2 - 2A_2 \eta + A_1}{k_0} \quad (10)$$

Область положительных коэффициентов (рис. 1), ограниченная кривой, задаваемой выражениями (6), (7) и особой прямой (8) может удовлетворять требованиям по степени устойчивости.

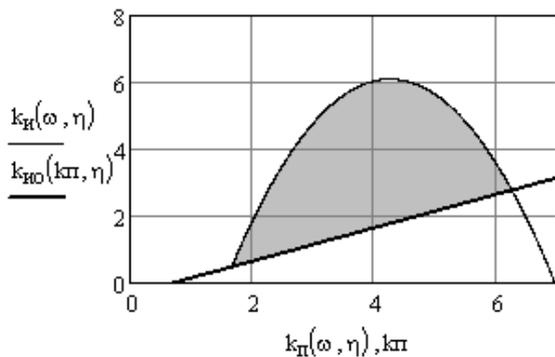


Рис.1. Область с заданной степенью устойчивости $\eta=0,5$ при $k_{д}=1$; $k_0=9$; $A_0=2$; $A_1=12$; $A_2=6$; $A_3=1,2$

Проверку предположения осуществляют путем выбора любой точки из предполагаемой области, решения уравнения (3) для выбранных коэффициентов $k_{п}$, $k_{и}$ и проверки действительных частей всех корней.

ЗАДАЧА 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ С МАКСИМАЛЬНОЙ СТЕПЕНЬЮ УСТОЙЧИВОСТИ ДЛЯ ОБЪЕКТА С ТОЧЕЧНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ

При увеличении требуемой степени устойчивости область коэффициентов уменьшается и при достижении максимально возможного значения она превращается в линию или точку, затем исчезает. Назовем первую по частоте ω точку пересечения или соприкосновения D-границы с особой линией (точку контакта) начальной, а следующую конечной. В частном случае начальная и конечная точки могут совпадать. В зависимости от соотношения коэффициентов полинома, а также значения $k_{д}$, увеличение η может различно влиять на изменение D-границы и точек её контакта с особой линией. В данной работе рассматривается случай, когда начальная точка контакта находится в положительной области коэффициентов. Как следует из выражений (9), (10) это условие можно обеспечить за счет увеличения коэффициента $k_{д}$.

Случай 1 поведения D-границы. С увеличением η начальная точка перемещается слева направо, конечная – в обратную сторону, D-граница остается над особой линией (рис. 2).

При достижении η максимально возможного значения D-область превращается в вертикальную прямую (рис. 2, сплошная линия). Точки пересечения граничной кривой с особой линией для $\omega=0$ и $\omega \neq 0$ совпадают. При дальнейшем увеличении η конечная точка пересечения граничной кривой с особой линией перемещается влево от начальной точки (рис. 2, штрихпунктирная линия), область с заданной степенью устойчивости исчезает.

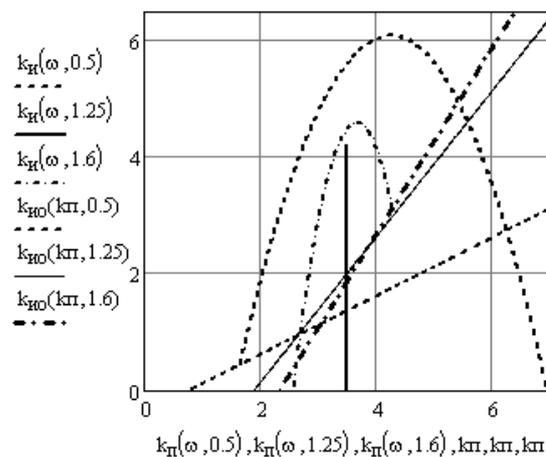


Рис.2. Изменение области с заданной степенью устойчивости при $\eta=0,5$; $\eta=1,25$; $\eta=1,7$; $k_{д}=1$; $k_0=9$; $A_0=2$; $A_1=12$; $A_2=6$; $A_3=1,2$

Условие для максимальной степени устойчивости – пересечение особой прямой и границы D-области только в одной точке в положительной области коэффициентов.

Случай 2 поведения D-границы. С увеличением η конечная точка перемещается справа налево, D-граница опускается ниже особой линии (рис. 3).

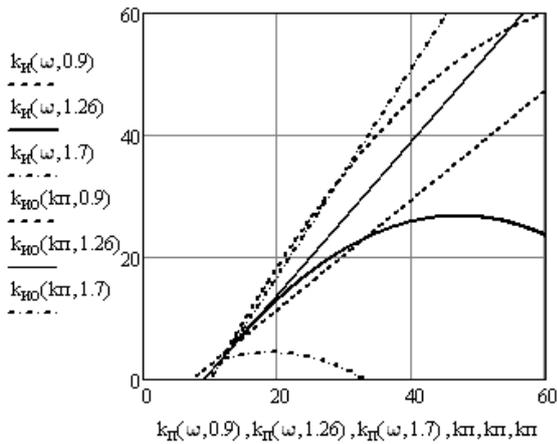


Рис.3. Изменение области с заданной степенью устойчивости при $\eta=0,9$; $\eta=1,26$; $\eta=1,7$; $k_d=10$; $k_o=9$; $A_0=2$; $A_1=12$; $A_2=30$; $A_3=1,2$

При достижении η максимально возможного значения D-область превращается в точку (рис. 3, сплошная линия). Точки контакта граничной кривой с особой линией для $\omega=0$ и $\omega \neq 0$ совпадают. Касательная к D-границе в начальной точке совпадает с особой линией. При дальнейшем увеличении η граничная кривая опускается ниже особой линии (рис. 3, штрихпунктирная линия), область с заданной степенью устойчивости исчезает.

Условие для максимальной степени устойчивости – равенство производных по k_p от D-функции и функции, описывающей особую прямую, в начальной точке контакта в положительной области коэффициентов.

Рассмотрим подробнее оба случая.

Случай 1. Координаты точки пересечения определяются из системы уравнений

$$k_p(\omega, k_d, \eta, \mathbf{A}) = k_p(0, k_d, \eta, \mathbf{A}), \quad (11)$$

$$k_i(\omega, k_d, \eta, \mathbf{A}) = k_i(0, k_d, \eta, \mathbf{A}). \quad (12)$$

Учитывая выражение (6), для объекта 3-го порядка условие (11) будет выполнено при $4\eta A_3 \omega^2 - A_2 \omega^2 = 0$ или $4\eta A_3 - A_2 = 0$.

Отсюда

$$\eta_{\max} = \frac{A_2}{4A_3}. \quad (13)$$

Для значений $A_2 = 6$, $A_3 = 1,2$, $\eta_{\max} = 1,25$ и граница D-области вырождается в вертикальную прямую. Соответственно, значение $k_p = 3,527778$, k_i может выбираться из интервала $[2,01823; 4,21874]$. Решение уравнения (3) при оговоренных значениях коэффициентов объекта и регулятора дают корни с действительными частями, равными - 1,25.

Для объекта 4-го порядка уравнения (11) и (12) принимают вид:

$$10\eta^2 A_4 - A_4 \omega^2 - 4A_3 \eta + A_2 = 0,$$

$$4\eta A_4 \omega^2 + 2\eta^2 A_3 - A_3 \omega^2 - 2A_2 \eta + A_1 + k_o \cdot k_d = 0.$$

Исключая ω из этих двух уравнений, запишем

$$40\eta^3 (A_4)^2 - 24A_4 A_3 \eta^2 + (2A_4 A_2 + 4A_3^2) \cdot \eta - A_3 A_2 + A_4 A_1 + A_4 \cdot k_o \cdot k_d = 0.$$

Решая полученное уравнение относительно η при $A_4 = 0,04$; $A_3 = 1,2$; $A_2 = 6$; $A_1 = 12$; $A_0 = 2$; $k_o = 9$; $k_d = 1$, получим $\eta_{\max} = 1,315$; $k_p = 3,602829$; $k_i = 2,1298$.

Как и в предыдущем случае, граница D-области вырождается в прямую, но она уже будет наклонная.

Аналогично, для объекта 5-го порядка

$$W_2(s) = \frac{k_o}{A_5 s^5 + A_4 s^4 + A_3 s^3 + A_2 s^2 + A_1 s + A_0}$$

уравнения (9) и (10) запишутся как:

$$-20\eta^3 A_5 - 6\eta A_5 \omega^2 + 10\eta^2 A_4 - A_4 \cdot \omega^2 - 4A_3 \eta + A_2 = 0,$$

$$A_5 \omega^4 - 9\eta^2 A_5 \omega^2 - 5\eta^4 A_5 + 4\eta A_4 \omega^2 +$$

$$+ 2\eta^2 A_3 - A_3 \omega^2 - 2A_2 \eta + A_1 + k_o \cdot k_d = 0.$$

Исключая ω из уравнений, находим η и выбираем приемлемое действительное решение. При $A_5 = 0,0017$ и сохранении остальных коэффициентов, получаем значения $\eta_{\max} = 1,3296$; $k_p = 3,6357$; $k_i = 2,1723$.

Дальнейшее увеличение порядка объекта приводит к увеличению порядков решаемых уравнений, но эти решения возможны.

Случай 2.

Производная для особой линии по k_p в соответствии с выражением (8) равна η .

Производная от $k_i(\omega, k_d, \eta, \mathbf{A})$ по $k_p(\omega, k_d, \eta, \mathbf{A})$ может быть получена как

$$\frac{\partial}{\partial \omega} k_i(\omega, k_d, \eta, \mathbf{A}) / \frac{\partial}{\partial \omega} k_p(\omega, k_d, \eta, \mathbf{A}).$$

Используя выражения (6), (7), получаем:

$$\frac{\partial}{\partial \omega} k_{и}(\omega, k_{д}, \eta, \mathbf{A}) = 2\omega \cdot k_{д} + 2\omega \cdot \frac{2A_3\eta^2 - 2A_2\eta - 2A_3\omega^2 + A_1}{k_0},$$

$$\frac{\partial}{\partial \omega} k_{п}(\omega, k_{д}, \eta, \mathbf{A}) = -2\omega \cdot \frac{4A_3\eta - A_2}{k_0},$$

$$\frac{dk_{и}}{dk_{п}} = -\frac{2A_3\eta^2 - 2A_2\eta - 2A_3\omega^2 + A_1 + k_{д} \cdot k_0}{4A_3\eta - A_2}.$$

Приравнивая полученное последнее выражение η , решаем уравнение при $\omega=0$, т. е. в начальной точке контакта.

Для значений рассматриваемого примера $k_d=10$; $k_0=9$; $A_0=2$; $A_1=12$; $A_2=30$;

$A_3=1,2$ решение уравнения $\frac{dk_{и}}{dk_{п}} = \eta$ при $\omega=0$

дает $\eta_{\max}=1,26043$, что и показано на рис. 3. Значения коэффициентов равны: $k_{п}=13,5286$; $k_{и}=5,6651$.

Аналогично находятся значения максимальной степени устойчивости и коэффициенты регулятора для объектов большего порядка. Так, выражение особой линии для полинома n -го порядка может быть записано как

$$k_{и.о}(k_{д}, k_{п}, \eta, \mathbf{A}) = \eta \cdot k_{п} - k_{д} \eta^2 + \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (-1)^i A_i \eta^{i+1}}{k_0} \quad (14)$$

и производная по $k_{п}$ для всех случаев будет равна η .

Для объекта пятого порядка производная

$$\frac{dk_{и}}{dk_{п}} = \frac{5A_5\eta^4 - 2A_3\eta^2 + 2A_2\eta - A_1 - k_{д} \cdot k_0}{20A_5\eta^3 - 10A_4\eta^2 + 4A_3\eta - A_2}. \quad (15)$$

Для четвертого порядка в выражении (15) следует принять A_5 равным 0.

ЗАДАЧА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ С МАКСИМАЛЬНОЙ СТЕПЕНЬЮ УСТОЙЧИВОСТИ ДЛЯ ОБЪЕКТА С ИНТЕРВАЛЬНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ

При синтезе робастной системы управления с заданной степенью устойчивости для объекта с интервальными коэффициентами необходимо, чтобы D -область для коэффициентов регулятора, обеспечивающая необходимую степень устойчивости, существовала для каждого углового полинома и существовала подобласть, общая для всех угловых полиномов.

Общая для всех полиномов подобласть будет существовать, когда для любой границы D -области, соответствующей определенному характеристическому полиному, конечная точка её пересечения с верхней особой линией будет находиться правее всех начальных точек пересечения граничных кривых с этой особой линией. Если при этом, хотя бы одна начальная и конечная точки пересечения совпадают, степень устойчивости будет максимально возможной.

На рис. 4 показан пример общей подобласти интервального полинома четвертого порядка при степени устойчивости $\eta=0,7$ для пяти из 16 угловых полиномов, которые могут быть получены при четырех интервальных коэффициентах: $\underline{A_0} = 2$, $\overline{A_0} = 4$, $\underline{A_1} = 12$, $\overline{A_1} = 15$, $\underline{A_2} = 4$, $\overline{A_2} = 6$, $\underline{A_3} = 1$, $\overline{A_3} = 1,2$ (верхнее надчеркивание соответствует верхнему пределу интервального коэффициента, нижнее подчеркивание – нижнему пределу).

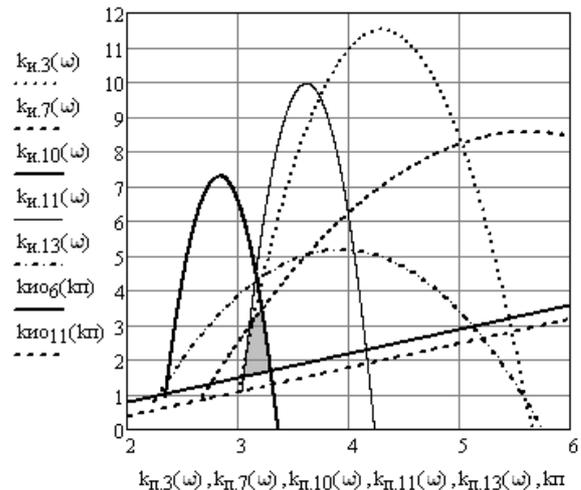


Рис. 4. Область с заданной степенью устойчивости для интервального полинома

Нумерация полиномов производилась по правилу двоичной кодировки: полином 1 соответствует всем нижним пределам коэффициентов, полином 2 – верхнему пределу коэффициента A_0 и нижним остальным, 3 – верхнему пределу коэффициента A_1 и нижним остальным и т. д. Полиномы 7, 10 и 13 являются полиномами Харитонова. К сожалению, теорема Харитонова при замене в характеристическом полиноме s на $-\eta + j \cdot \omega$ уже не выполняется и анализ необходимо проводить для всех угловых полиномов.

Как следует из рисунка, область коэффициентов со степенью устойчивости $\eta=0,7$

ограничивается полиномами 3, 7, 10 и 11, а также самой верхней особой линией, соответствующей шестому полиному. Верхняя особая линия будет при максимальной сумме в третьем слагаемом (14), что соответствует чередованию верхних и нижних пределов интервальных коэффициентов в характеристическом полиноме объекта:

$$D\sigma^*(s) = \overline{\mathbf{A}}_0 + \underline{\mathbf{A}}_1s + \overline{\mathbf{A}}_2s^2 + \underline{\mathbf{A}}_3s^3 + \overline{\mathbf{A}}_4s^4 + \dots \quad (16)$$

Координаты точек пересечения границ с верхней особой линией определяются из уравнений (11), (12), в которых век-

тор коэффициентов \mathbf{A} в правой части записывается в соответствии с (16). Обозначим его как \mathbf{A}^* , тогда уравнения для точек пересечения примут вид:

$$k_{\Pi}(\omega, k_d, \eta, \mathbf{A}) = k_{\Pi}(0, k_d, \eta, \mathbf{A}^*),$$

$$k_{\Pi}(\omega, k_d, \eta, \mathbf{A}) = k_{\Pi}(0, k_d, \eta, \mathbf{A}^*).$$

Для рассмотренного выше примера с объектом третьего порядка и четырьмя интервальными параметрами максимальная степень устойчивости будет случае, когда конечная точка пересечения десятого полинома совпадет с начальной точкой одиннадцатого (рис. 5).

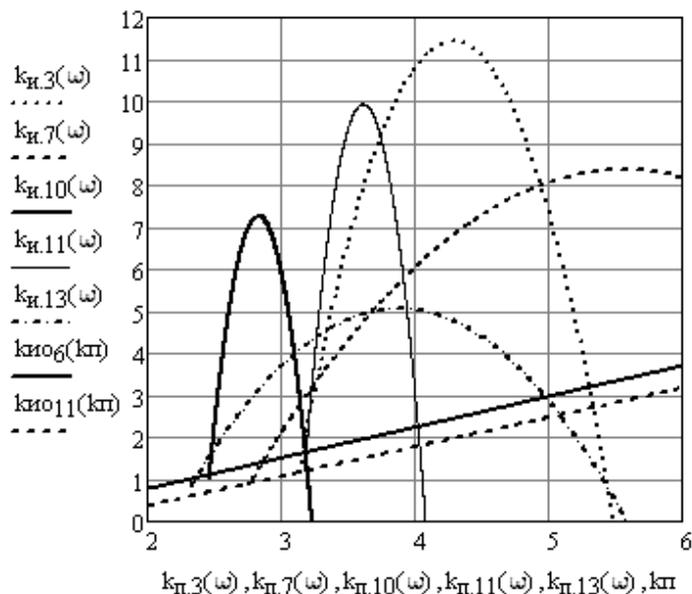


Рис.5. Расположение D-областей при максимальной степени устойчивости

ВЫВОДЫ

В статье приведены результаты исследования поведения границ D-областей при изменении коэффициентов пропорциональной и интегральной составляющих регулятора в зависимости от соотношения коэффициентов объекта и дифференциальной состав-

ляющей регулятора. Для двух вариантов поведения границ сформулированы условия достижения максимальной степени устойчивости в замкнутой системе регулирования для объектов с точечными и интервальными коэффициентами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волков, А.Н. Метод синтеза систем автоматического управления с максимальной степенью устойчивости при наличии ограничений / А.Н. Волков, Ю.В. Загашвили. –Текст: непосредственный // Известия РАН. Сер. Теория и системы управления. – 1997. –№3. –С. 12–19.
2. Шубладзе, А.М. Способы синтеза систем управления максимальной степени устойчивости / А.М. Шубладзе. –Текст: непосредственный // Автоматика и телемеханика. – 1980. –№ 1. –С. 28–37.
3. Пушкарев, М. И. Параметрический синтез робастного регулятора, обеспечивающего квазimaxимальную степень устойчивости интервальной системы / М.И. Пушкарев, С.А. Гайворонский. –Текст: непосредственный // Управление, вычислительная техника и информатика. Доклады ТУСУРа. –2012. –№ 2 (26). –С. 162–165.
4. Неймарк, Ю.И. Робастная устойчивость и D-разбиение / Ю.И. Неймарк. –Текст: непосредственный // Автоматика и телемеханика. – 1992. –№ 7 –С. 10–18.

5. Оморов, Р.О. Робастная устойчивость интервальных динамических систем / Р.О. Оморов . – Бишкек.: Илим, 2018. – 104 с. –Текст : непосредственный.
6. Шубладзе, А.М. Достаточные условия экстремума в системах максимальной степени устойчивости / А.М. Шубладзе. –Текст: непосредственный // Автоматика и телемеханика. 1997. – № 3. – С. 93 – 105.
7. Шубладзе, А.М. Исследование оптимальных по степени устойчивости решений при ПИ управлении. –Текст: непосредственный / А.М. Шубладзе, В.Е. Попадько [и др.] / Проблемы управления.–2008.–№ 2. – С. 12-21.
8. Шубладзе, А.М. Исследование оптимальных по степени устойчивости решений при ПИД управлении. – Текст: непосредственный / А.М. Шубладзе, В.Е. Попадько [и др.]. –Текст: непосредственный // Управление большими системами. Выпуск 25.– 2008.– С. 86-100.
9. Неймарк, Ю.И. Об определении значений параметров, при которых система автоматического регулирования устойчива. –Текст: непосредственный / Ю.И. Неймарк. // Автоматика и телемеханика. –1948. –№ 3. –С. 190 –203.
10. Барметов, Ю.П. Синтез робастных систем управления с заданной степенью устойчивости / Ю.П. Барметов, А.Ю. Шинкаренко. – Текст: непосредственный. // Моделирование энергоинформационных процессов: сб. статей X нац. науч.-практ. конф. / ВГУИТ. – Воронеж, 2022. – С. 15–21.

REFERENCES

1. Volkov, A.N. Synthesis method for automatic control systems with a maximum degree of stability in the presence of restrictions / A.N. Volkov, Yu.V. Zagashvili // Izvestiya RAN. Ser. Theory and control systems. – 1997. – No 3. –P. 12–19. (in Russian)
2. Shubladze, A.M. Ways of synthesis of control systems of the maximum degree of stability / A.M. Shubladze. // Automation and telemechanics. – 1980. – No 1. – P. 28–37.(in Russian)
3. Pushkarev, M.I. Parametric synthesis of a robust controller providing a quasi-maximal degree of stability of an interval system / M.I. Pushkarev, S.A. Gaivoronsky.// Management, computer technology and informatics. Reports of TUSUR.–2012.–No 2 (26).– P. 162 –165. (in Russian)
4. Neimark, Yu.I. Robust stability and D-decomposition / Yu.I. Neimark// Automation and telemechanics. –1992.–No 7 –P. 10–18. (in Russian)
5. Omorov, R.O. Robust stability of interval dynamical systems / R.O. Omorov. - Bishkek.: Ilim, 2018. – 104 p.(in Russian)
6. Shubladze, A.M. Sufficient conditions for an extremum in systems with a maximum degree of stability / A.M. Shubladze// Automation and telemechanics. – 1997. –No. 3. – P. 93–105. (in Russian)
7. Shubladze, A.M. Investigation of solutions optimal in terms of stability under PI control. - / A.M. Shubladze, V.E. Popadko [et al.]// Problems of management. – 2008. – No 2. –P. 12-21.(in Russian)
8. Shubladze, A.M. Investigation of solutions optimal in terms of stability under PID control. - Text: direct / A.M. Shubladze, V.E. Popadko [et.al.] // Management of large systems. Issue 25.–2008.–P. 86–100. (in Russian)
9. Neimark, Yu.I. On determining the parameter values for which the automatic control system is stable / Yu.I. Neimark. // Automation and telemechanics. 1948. – No 3.– P. 190–203. (in Russian)
10. Barmetov Yu.P. Synthesis of robust control systems with a given degree of stability / Yu.P. Barmetov, A.Yu. Shinkarenko. // Modeling of energy-informational processes: Sat. Articles X nat. scientific-practical. conf. / VSUIT. – Voronezh, 2022. – P. 15–21. (in Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, ORCID, Email)
Барметов Ю.П.	к.т.н.. доцент,  0000-0002-3836-9407 , barmetovu@mail.ru

AUTHORS INFORMATION

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, ORCID, Email)
Barmetov Y.P.	PhD, Associate Professor,  0000-0002-1535-6179 , barmetovu@mail.ru

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ЦИКЛИЧЕСКИХ АДсорбЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ И МЕТОДЫ ЕЕ РЕШЕНИЯ

Дворецкий С.И.	1	 0000-0002-4352-810X	dvoretsky@yahoo.com
Дворецкий Д.С.	1	 0000-0002-7571-3748	sdvoretsky@mail.tstu.ru
Акулинин Е.И.	1	 0000-0003-0848-4380	akulinin-2006@yandex.ru
Усачёв В.Б.	2	-	npo@sialuch.ru
Беляев В.А.	2	-	npo@sialuch.ru

¹Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская, д.106/5, пом. 2, Тамбов, 392000, Россия, кафедра "Технологии и оборудование пищевых и химических производств".

²АО "НИИ НПО "Луч", Протвинский филиал, ул. Железнодорожная, 24,г. Подольск, Московская обл., 142103, Россия

Аннотация: рассматривается учет неопределенностей в постановке задачи оптимизации режимных параметров функционирования установки короткоциклового адсорбции с учетом выполнения регламентных требований технического задания на проектирование установки, а также разработка метода и алгоритма решения сформулированной задачи оптимизации в условиях неопределенности исходной информации. С использованием модели динамики сорбции, разработанной на основе теории объемного заполнения микропор академика М.М. Дубинина, сформулирована задача оптимизации (по критерию степени извлечения (концентрирования) продуктового газа (кислорода, водорода и др.)) режимных параметров адсорбционных процессов обогащения газовой смеси продуктовым газом с учетом выполнения требований по его чистоте, производительности установки короткоциклового адсорбции и ресурсосбережению гранулированного адсорбента в условиях частичной неопределенности исходных данных для типового ряда установок напорного и вакуум-напорного типа при различных значениях их производительности. Разработан экономичный алгоритм решения задачи оптимизации циклических адсорбционных процессов обогащения газовой смеси продуктовым газом (кислородом, водородом и др.) в условиях неопределенности исходных данных. Предложенный алгоритм позволяет сводить задачу оптимизации к известной задаче нелинейного программирования и использовать для ее решения высокоэффективные методы. Рассмотрен пример оптимизации циклического адсорбционного процесса обогащения воздуха кислородом в двухадсорберной установке короткоциклового адсорбции. По результатам решения задачи оптимизации показано, что учет ограничения максимального значения скорости воздуха в "лововом" слое адсорбента обеспечивает предохранение гранулированного адсорбента от разрушения вследствие аэродинамического удара при полном скачкообразном открытии управляющих клапанов, что способствует увеличению срока службы адсорбента. Учет неопределенностей позволяет гарантированно обеспечить заданные требования по чистоте концентрируемого кислорода и производительности установки КЦА независимо от значений, которые принимают неопределенные параметры из заданных интервалов их возможного изменения.

Ключевые слова: короткоциклового адсорбция, цеолитовый адсорбент, концентрирование продуктового газа, изотерма адсорбции, кинетика, математическая модель динамики сорбции, оптимизация, неопределенности, алгоритм.

THE PROBLEM OF PRESSURE SWING ADSORPTION GAS MIXTURES SEPARATION PROCESSES OPTIMIZATION UNDER UNCERTAINTY

Dvoretzky S. I.	1	 0000-0002-4352-810X	dvoretsky@yahoo.com
Dvoretzky D. S.	1	 0000-0002-7571-3748	sdvoretsky@mail.tstu.ru
Akulinin E. I.	1	 0000-0003-0848-4380	akulinin-2006@yandex.ru
Usachev V. B.	2	-	npo@sialuch.ru
Belyaev V.A.	2	-	npo@sialuch.ru

¹Tambov State Technical University, st. Sovetskaya, d.106/5, room. 2, Tambov, 392000, Russia, Department of Technologies and Equipment for Food and Chemical Production.

²JSC "NII NPO "Luch", Protvinsky branch, Zheleznodorozhnaya st., 24, Podolsk, Moscow region, 142103, Russia

Abstract: the article considers a semi-adjoint problem of mathematical modeling of the process of dissipative heating of a rubber product (elastomer) during its thermomechanical processing in the inter-rotor (inter-roll) gap of a special heated Brabender chamber. The velocity fields are calculated for the stationary regime, and the thermal problem was solved in dynamics, using the identified stationary shear velocity field. A mathematical model of a non-isothermal flow of an elastomer in a slotted gap with moving walls has been developed. The elastomer being pro-

cessed is presented as a viscoelastic medium undergoing deep deformation. The modeling process was carried out under the assumptions that the stress tensor deviator is considered as the sum of the viscous and viscoelastic components, and the viscoelastic stress tensor has several modes and is mathematically represented in accordance with the linear superposition rule. The Giesekus model was used as a rheological model describing the nonlinear component of the deformation process. To analyze the dynamics of heating and the effect of the linear velocity of wall rotation on its intensity, we used the calculation of the temperature averaged over the area of the gap. The results of computer simulation showed that the time of the transient stabilization of the velocity field is several times less than that of the process of stabilization of the temperature field. In this case, the maximum stress values occur in the center of the processed sample with an increase in the rotational speed. It has been established that there is a slight uneven heating of the elastomer due to the dissipation of mechanical energy, and the dynamics of the process of temperature increase includes two areas: a quasi-linear section with an approximately constant heating rate, and a section characterized by a decrease in the heating rate to near-zero values. With an increase in the speed of movement, a non-linear increase in the temperature averaged over the area in the gap occurs after a given processing time. The calculations carried out on the computer and the results of comparing their results with experimental data showed that until a certain rotational speed and processing time are reached, the temperature changes linearly in time and its value after a given processing time is proportional to the square of the wall motion velocity. The dependence of the temperature of processed samples, previously subjected to ionization radiation, on the intensity of mechanical treatment is obtained. The proposed model makes it possible to qualitatively and quantitatively correctly describe the temperature dynamics of the product during thermomechanical processing in a given range of operating parameters, which allows it to be further used as a mathematical tool for estimating the magnitude of the control actions of a given technological process.

Key words: pressure swing adsorption, zeolite, product gas concentration, adsorption isotherm, kinetics, mathematical model of sorption dynamics, optimization, uncertainty, algorithm

ВВЕДЕНИЕ

Производительность и качество продуктового газа (кислорода, водорода и др.), получаемого в промышленных газоразделительных установках короткоциклового безнагревной адсорбции (КБА, КЦА), достигаются не только за счет увеличения объема адсорбента, но и за счет оптимизации режимных переменных стадий, составляющих цикл "адсорбция-десорбция (регенерация)". При этом математическая модель должна учитывать конечную скорость релаксации профиля давления вдоль слоя адсорбента при частой смене стадий цикла и влияние непрерывного изменения условий фильтрации газовой смеси на динамику процесса адсорбционного газоразделения. В общем виде математическая модель динамики сорбции, осуществляемой по способу КЦА, включает уравнения покомпонентного материального баланса веществ, изотермы сорбции, кинетики сорбции и гидродинамики [1]. Уравнения модели, наиболее часто применяемые для решения практических задач динамики сорбции, представляют собой системы одномерных дифференциальных уравнений в частных и обыкновенных производных первого или второго порядка с начальными и граничными условиями для каждой стадии цикла "адсорбция-десорбция". Гораздо реже используются двумерные математические модели из-за необходимости решения уравнений Навье-Стокса

для расчета поля скоростей газового потока в пористой среде адсорбента.

При оптимизации циклических адсорбционных процессов газоразделения необходимо осуществлять расчет уравнений динамики сорбции до достижения стационарного периодического режима (в англоязычной литературе – CyclicSteadyState (CSS)) функционирования установки КЦА [2], когда концентрация продуктового газа в текущем и в предыдущем циклах адсорбции-десорбции отличаются меньше, чем наперед заданная величина точности расчета. Количество циклов, которое необходимо осуществить до наступления стационарного периодического режима, зависит от режимных и конструктивных параметров установки КЦА, свойств газа и адсорбента, и может составлять от нескольких десятков до сотен циклов, что существенно увеличивает время решения задачи оптимизации циклических адсорбционных процессов разделения газовых смесей в условиях неопределенности.

При оптимизации циклических адсорбционных процессов часто используют так называемую неопределенную информацию о физико-химических характеристиках исходных газовых смесей, конструктивных параметрах установок КЦА, внешних условиях эксплуатации, стоимостных данных, что опосредованно оказывает заметное влияние на качество их функционирования, оцениваемое технико-экономическими показателями,

например, степенью извлечения (концентрирования), себестоимостью продуктового газа, прибылью от эксплуатации установки КЦА и др. Так, например, состав, температура и давление подлежащей разделению газовой смеси могут изменяться случайным образом в некоторых диапазонах в течение срока эксплуатации установки КЦА, математическая модель динамики сорбции включает приближенные (неточные) значения кинетических коэффициентов сорбции, характеристик адсорбента (свойств и размеров гранул адсорбента от партии к партии) и др., что необходимо учитывать при постановке задачи оптимизации режимов ее функционирования.

Целью данной работы является учет неопределенностей в постановке задачи оптимизации режимных параметров функционирования установки КЦА с учетом выполнения регламентных требований по чистоте продуктового газа, производительности установки и ресурсосбережению гранулированного адсорбента в условиях частичной неопределенности исходных данных, а также разработка метода и алгоритма решения сформулированной задачи оптимизации в условиях неопределенности исходной информации.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ЦИКЛИЧЕСКИХ АДСОРБЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Типовая оптимизационная задача содержит целевую функцию (критерий оптимальности) $I(u) = \varphi(x_n, u, d, y)$ (где x_n – нагрузка на установку КЦА, d – вектор конструктивных параметров установки КЦА); y – вектор выходных переменных установки КЦА; $u \in U$ – вектор режимных переменных функционирования установки КЦА, принадлежащий множеству U допустимых режимов функционирования установки КЦА; связи – систему уравнений математической модели динамики сорбции при разделении газовой смеси и концентрировании продуктового газа [3], которую мы формально будем обозначать через нелинейную вектор-функцию $F(x_n, u, d, y, b) = 0$, где b – вектор параметров (коэффициентов) математической модели динамики сорбции; регламентные ограничения $g_j(x_n, u, d, y) \leq 0$, $j = 1, 2, 3, \dots$, а также, собственно, математическую постановку задачи. Для численного решения модели динамики сорбции – системы нелинейных диффе-

ренциальных уравнений с частными производными $F(x_n, u, d, y, b) = 0$ с начальными и граничными условиями [3] применяли метод прямых в программной среде MatLab с использованием ограничителя потока Ван Лира для предотвращения эффекта ложных осцилляций [4,5].

Интегрирование уравнений динамики сорбции осуществлялось до наступления стационарного периодического режима в адсорбере установке КЦА, контролируемого по условию $|y_{1,i}^{\text{out}}(\tau_{\text{ads}}, L) - y_{1,i-1}^{\text{out}}(\tau_{\text{ads}}, L)| \leq e$, где $y_{1,i}^{\text{out}}$ – концентрация продуктового газа на выходе установки КЦА; e – малое положительное число, $e = 10^{-3}$; i – номер цикла "адсорбция-десорбция"; время t_{css} наступления стационарного периодического режима рассчитывали по формуле $t_{\text{css}} = i^* \times \tau_c$, где i^* – номер цикла, при котором выполняется условие $|y_{1,i}^{\text{out}}(\tau_{\text{ads}}, L) - y_{1,i-1}^{\text{out}}(\tau_{\text{ads}}, L)| \leq e$; τ_c – длительность цикла "адсорбция-десорбция", $\tau_c = \tau_{\text{ads}} + \tau_{\text{des}}$, τ_{ads} – длительность стадии "адсорбция", τ_{des} – длительность стадии "десорбция". Вычислительное время выхода установки КЦА на стационарный периодический режим, в среднем, составляет ~210 с.

Введем неопределенные параметры (состав, температуру и давление подлежащей разделению газовой смеси, приближенные (неточные) значения кинетических коэффициентов сорбции, случайные изменения характеристик адсорбента (свойства и размеры гранул адсорбента от партии к партии) в ходе эксплуатации установки КЦА и др.) и обозначим их через вектор ξ из ограниченного числового множества $\Xi = \{\xi_\rho; \xi_\rho^- \leq \xi_\rho \leq \xi_\rho^+\}$, $\rho = \overline{1, n_\xi}$. Тогда критерий оптимальности $\varphi(x_n, u, d, y(\xi))$, например, технологический или экономический критерий, будет включать вектор случайных неопределенных параметров ξ . В этом случае в качестве критерия оптимальности в задаче оптимизации будем использовать среднее значение критерия $\varphi(x_n, u, d, y(\xi))$, т.е. математическое ожидание $M_\xi\{\varphi(x_n, u, d, y(\xi))\}$ целевой функции $\varphi(x_n, u, d, y(\xi))$, где $M_\xi\{\cdot\}$ – символ математического ожидания. При фиксированных векторах x_n, d, u и ξ мы можем рассматривать уравнения модели динамики сорбции [3] как систему нелинейных дифференциальных уравнений в частных и обыкновенных производных для опре-

деления вектора y ; следовательно, y – неявная вектор-функция переменных x_H, d, u и ξ – $y = y(x_H, d, u, \xi)$. Явный вид этой функции, как правило, неизвестен, поэтому для каждой совокупности векторов x_H, d, u, ξ выходные координаты y технологического процесса и установки адсорбционного разделения газовых смесей будем находить численным решением системы уравнений $F(x_H, u, d, y, b) = 0$ динамики сорбции в течение времени переходного процесса $t = t_{CSS}$ до установления режима стационарного периодического процесса [2].

Будем предполагать, что во время эксплуатации установки КЦА неопределенные параметры ξ либо постоянны, либо меняются достаточно медленно. Поэтому задача оптимизации ее режимов функционирования будет ставиться как аргументная задача оптимизации режимных переменных установки КЦА, а оптимальный режим, найденный решением такой оптимизационной задачи, может быть реализован с помощью системы автоматической стабилизации.

Эффективность функционирования установки КЦА может оцениваться различными технико-экономическими показателями (критериями оптимальности) функционирования установки, например, степенью извлечения целевого продукта; с себестоимостью концентрирования продуктового газа до заданной чистоты; приведенными затратами на производство продуктового газа; прибылью от эксплуатации установки КЦА за определенный период времени и др. Вычисление значений критериев оптимальности осуществляется в режиме стационарного периодического процесса, т.е. численным интегрированием дифференциальных уравнений в частных и обыкновенных производных, описывающих динамику процесса сорбции на отрезке времени $[0, t_{CSS}]$.

К конструктивным параметрам $d \in D$ установки КЦА будем относить число и тип адсорберов, внутренний диаметр D_{int}^A обечайки адсорбера и высоту L слоя гранулированного адсорбента, пропускную способность K_V запорно-регулирующей арматуры (впускных и выпускных клапанов) установки КЦА; к режимным переменным $u \in U$ функционирования установки – продолжительности стадий адсорбции τ_{ads} и десорбции τ_{des} , давления P_{ads}, P_{des} на этих стадиях, коэффициент θ соотношения потоков газовой смеси, обо-

гащенной целевым газом и отбираемой на регенерацию адсорбента, и газовой смеси на входе в установку КЦА.

При оптимизации режимов функционирования установки КЦА должны быть удовлетворены регламентные ограничения, связанные с обеспечением требуемого качества выпускаемой продукции (чистоты c_1^{out} продуктового газа), заданной производительности или расхода G^{out} продуктового газа с заданной чистотой на выходе установки КЦА, ресурсосбережения адсорбента (ограничения по скорости газового потока в "лобовом" слое адсорбента), безопасности функционирования и экологической безопасности производства и др. Они могут быть разделены на две группы.

Первая группа содержит "жесткие" ограничения, которые должны безусловно выполняться несмотря на наличие неопределенности ξ :

$$\max_{\xi \in E} g_j(x_H, u, d, y(t_{CSS}, \xi)) \leq 0, \quad j = \overline{1, p_1}.$$

К этой группе ограничений целесообразно отнести требования обеспечения чистоты извлекаемого (концентрируемого) газа, ресурсосбережения адсорбента, безопасности функционирования и экологической безопасности производства.

Вторая группа включает более "мягкие" ограничения, которые должны выполняться либо в среднем, либо с заданной вероятностью P_c : $\Pr\{g_j(x_H, u, d, y(t_{CSS}, \xi)) \leq 0\} \geq P_c$, где обычно $P_c \in (0,85 \dots 0,95)$, $j = \overline{p_1 + 1, p_2}$. К этой группе ограничений следует отнести требования обеспечения заданной производительности установки, себестоимости производимой продукции, приведенных затрат на извлечение (концентрирование) продуктового газа и т.д.

Сформулируем задачу оптимизации (по критерию степени извлечения (концентрирования) продуктового газа) режимов функционирования установки КЦА с "жесткими" ограничениями в условиях неопределенности: при заданных нагрузке x_H и векторе $d \in D$ конструктивных параметров установки КЦА требуется определить вектор режимных переменных $u^* \in U$ такой, что

$$I(u^*) = \max_{u \in U} M_{\xi} \{ \varphi(x_H, u, d, y(\xi)) \} \quad (1)$$

при связях

$$F(x_H, u, d, y, \xi) = 0 \quad (2)$$

и ограничениях [3]:

по чистоте c_1^{out} продуктового газа (кислорода, водорода)

$$\max_{\xi \in \Xi} (g_1(u, y(t_{css}, \xi)) = \underline{c}_1^{out} - c_1^{out}(u, y(t_{css}, \xi))) \leq 0; \quad (3)$$

производительности установки КЦА

$$\max_{\xi \in \Xi} (g_2(u, y(t_{css}, \xi)) = \underline{G}^{out} - G^{out}(u, y(t_{css}, \xi))) \leq 0; \quad (4)$$

скорости газовой смеси в "лобовом" слое адсорбента

$$\max_{\xi \in \Xi} (g_3(u, \xi) = \max_{\tau \in [0, \tau_c]} v_g(u, \xi) - v_g^+) \leq 0; \quad (5)$$

перепаду давления в слое адсорбента на стадиях адсорбции и десорбции

$$\max_{\xi \in \Xi} (g_4(u, \xi) = \max_{\tau \in [0, \tau_{ads}]} \Delta P_{ads}(u, \xi) - \Delta P^+) \leq 0; \quad (6)$$

$$\max_{\xi \in \Xi} (g_5(u, \xi) = \max_{\tau \in [0, \tau_{des}]} \Delta P_{des}(u, \xi) - \Delta P^+) \leq 0; \quad (7)$$

– по варьированию режимных переменных $u \in U$:

$$u^- \leq u \leq u^+, \quad \xi^- \leq \xi \leq \xi^+, \quad (8)$$

где y – выходные переменные установки КЦА при разделении газовой смеси и концентрировании продуктового газа; \underline{G}^{out} – заданное значение расхода продуктового газа (кислорода, водорода) при заданной концентрации y_1^{out} на выходе установки КЦА; v_g^+ – максимально допустимое значение скорости газовой смеси в слое адсорбента; ΔP^+ – максимально допустимое значение перепада давления в адсорбционном слое адсорбера на стадиях адсорбции и десорбции.

Сформулированная аргументная задача оптимизации (1)-(8) с "жесткими" ограничениями относится к классу задач нелинейного программирования, при решении которой основной трудностью является вычисление многомерного интеграла (математического ожидания $M_{\xi}\{\varphi(x_H, u, d, y(\xi))\}$). Существует ряд методов экономичного вычисления многомерных интегралов, программная реализация которых имеется в пакетах прикладных программ. Первая группа методов основана на аппроксимации подынтегрального выражения с помощью конечного множества точек в пространстве интегрирования [6]; вычисление $M_{\xi}\{\varphi(x_H, u, d, y(\xi))\}$ осуществляется по приближенной формуле

$$I(u) = M_{\xi}\{\varphi(x_H, u, d, y(\xi))\} \approx \sum_{j \in J_1} \omega_j \varphi(x_H, u, d, y(\xi^j)),$$

где ω_j – весовые коэффициенты, удовлетворяющие условию $\omega_j \geq 0$, $\sum_{j \in J_1} \omega_j = 1$; $\xi^j (j \in J_1)$ – аппроксимационные точки, равномерно или иным образом покрывающие область неопределенности $\Xi = \{\xi_{\rho}: \xi_{\rho}^- \leq \xi_{\rho} \leq \xi_{\rho}^+\}$, $\rho = \overline{1, n_{\xi}}$.

Вторую группу методов представляют методы Монте-Карло и близкие к ним процедуры латинского гиперкуба и последовательности проб Хаммерслея, основанные на генерации псевдослучайных чисел [7,8]. В соответствии с техникой Монте-Карло для оценки интеграла используется следующая формула:

$$M_{\xi}\{\varphi(x_H, u, d, y(\xi))\} \approx N^{-1} \sum_{j \in J_1} \varphi(x_H, u, d, y(\xi^j)),$$

где $\xi^j (j \in J_1)$ – последовательность N случайных векторов ξ^j , имеющих равномерную плотность распределения вероятностей.

При использовании "мягких" (вероятностных) ограничений в постановке задачи оптимизации жесткие ограничения $\max_{\xi \in \Xi} g_{\lambda}(x_H, u, d, y(t_{css}, \xi)) \leq 0$ заменяются на ограничения вида (8)

$\Pr_{\xi}\{g_j(x_H, u, d, y(t_{css}, \xi)) \leq 0\} \geq P_c$, где P_c – доверительная вероятность.

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ЦИКЛИЧЕСКИХ АДсорбционных ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Покажем итерационный метод решения задачи оптимизации (1)-(8), позволяющий сводить задачу (1)-(8) к известной задаче нелинейного программирования, для решения которой разработаны высокоэффективные методы, например, метод последовательного квадратичного программирования. При этом необходимо априори вводить так называемые "критические" точки, в которых могут нарушаться ограничения задачи оптимизации $\max_{\xi \in \Xi} g_{\lambda}(x_H, u, d, y(t_{css}, \xi)) \leq 0$, $\lambda = \overline{1, 5}$.

Поскольку функции $g_{\lambda}(\cdot)$, $\lambda = \overline{1, 5}$ выпуклы, то в начальное множество S_2^0 "критических" точек целесообразно включить угловые точки $\xi_{\rho}^-, \xi_{\rho}^+$, $\rho = \overline{1, 2, 3, \dots}$ области неопределенности Ξ . В алгоритме нам понадобится вспомогательная задача (A), которая формулируется следующим образом: при заданных нагрузке x_H на установку КЦА и векторе конст-рук-

тивных параметров $d \in D$ требуется определить режимные переменные $u^* \in U$ такие, что

$$I(u^*) = \min_{u \in U} \sum_{j \in J_1} \omega_j \varphi(u, y(t_{css}, \xi^j)) \quad (\mathbf{A})$$

при связях $F(x_H, u, d, y(t_{css}), \xi) = 0$ и ограничениях [3]:

$$g_\lambda(u, y(t_{css}, \xi^j)) \leq 0, \quad \lambda = \overline{1,5}; \quad \xi^j \in S_1, j \in J_1;$$

$$g_\lambda(u, y(t_{css}, \xi^l)) \leq 0, \quad \lambda = \overline{1,5}; \quad \xi^l \in S_2, l \in J_2.$$

Сформулированная задача **(A)** относится к классу задач нелинейного программирования, для решения которой будем применять метод последовательного квадратичного программирования.

С учетом введенных выше понятий и сформулированной задачи **(A)** опишем итерационный алгоритм решения задачи оптимизации (1)-(8).

Шаг 1. Задать начальный номер итерации $v = 1$, совокупность аппроксимационных точек ξ^j , $j \in J_1$, $\xi^j \in S_1$, начальную совокупность критических точек $S_2^{(0)} = \{\xi^l: \xi^l \in \Xi, l \in J_2^{(v-1)}\}$, начальные приближения режимных переменных $u^{(0)}$.

Шаг 2. Методом последовательного квадратичного программирования найти решение вспомогательной задачи **(A)** – вектор режимных переменных $\hat{u}^{(v)} \in U$ и значение целевой функции $I(\hat{u}^{(v)})$.

Шаг 3. Проверить выполнение "жестких" ограничений задачи; для этого необходимо решить 5 экстремальных задач типа:

$$\max_{\xi \in \Xi} g_\lambda(\hat{u}^{(v)}, \hat{d}^{(v)}, y(t_{css}), \xi), \quad \lambda = \overline{1,5},$$

и определить 5 точек $\hat{\xi}^{(v),\lambda}$, $j = \overline{1,5}$, доставляющих максимум $g_\lambda(\cdot)$, $j = \overline{1,5}$.

Шаг 4. Образовать множество $R^{(v)}$ точек $\{\hat{\xi}^{(v)}\}$, в которых нарушаются ограничения задачи оптимизации:

$$R^{(v)} = \left\{ = A\{\hat{\xi}^{(v)}\}: g_\lambda(u^{(v)}, d^{(v)}, y(t_{css}), \hat{\xi}^{(v),\lambda}) > 0, \right. \\ \left. \lambda = \overline{1,5} = \pi r^2 \right\}.$$

Если это множество пустое, то решение задачи получено и $u^* = \hat{u}^{(v)}$, $I(u^*) = I(\hat{u}^{(v)})$, алгоритм заканчивает свою работу; в противном случае перейти к шагу 5.

Шаг 5. Сформировать новое множество критических точек $S_2^{(v)} = S_2^{(v-1)} \cup R^{(v)}$, положить $v := v + 1$, задать $u^{(v)} = \hat{u}^{(v-1)}$ и перейти к шагу 2

Определенным недостатком алгоритма является увеличение числа критических точек на каждой итерации и, соответственно, числа учитываемых ограничений. Однако при этом следует отметить, что количество итераций, необходимых для получения решения задачи оптимизации (1)-(8) с использованием описанного выше алгоритма

и приемлемой для практики точностью, как правило, не превышает 3-5.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЦИКЛИЧЕСКОГО АДСОРБЦИОННОГО ПРОЦЕССА НА ПРИМЕРЕ ОБОГАЩЕНИЯ ВОЗДУХА КИСЛОРОДОМ

При оптимизации циклических адсорбционных процессов при обогащении атмосферного воздуха кислородом будем учитывать, что его состав, температура и давление могут изменяться случайным образом в некоторых диапазонах в течение срока эксплуатации установки КЦА: концентрация кислорода в воздухе может колебаться от 18 до 21 об. %, температура – от 293 до 323 К, давление – от 0.75×10^5 до 1.0×10^5 Па [9].

Процесс обогащения воздуха кислородом осуществляется в двухадсорберной установке КЦА [7]. Целью оптимизации является извлечение (концентрирование) кислорода с заданной концентрацией y_1^{out} , об. % (ограничение 3 в постановке задачи (1)-(8)) и в заданном количестве (расход G^{out} концентрированного кислорода с концентрацией c_1^{out} должен быть не ниже заданного \underline{G}^{out} (ограничение 4)).

Исходные данные и диапазоны варьирования режимных для исследования задачи оптимизации циклического адсорбционного процесса обогащения воздуха кислородом приведены в табл. 1.

На рис. 1 представлены оптимальные "средние" значения степени извлечения η кислорода чистоты кислорода y_1^{out} для типового ряда установок КЦА производительностью 1...8 нл/мин при соответствующих оптимальных значениях режимных параметров (рис. 1).

Сравнительный анализ оптимальных режимов функционирования установки КЦА позволяет сделать вывод о том, что учет неопределенностей, вообще говоря, приводит к снижению степени извлечения η кислорода, в среднем, на ~2 % и повышению давления P^{in} на выходе компрессора на ~11,2%, коэффициента θ обратного потока на ~14,3%, длительности τ_{ads} полуцикла на ~44,6%, что приводит к увеличению энергозатрат установки КЦА на осуществление извлечения (концентрирования) кислорода, в среднем, на 10%. Несмотря на это решение задачи с учетом неопределенностей позволяет

Таблица 1. Исходные данные для проведения вычислительных экспериментов

Исходные данные задачи:	Значения
Состав газовой смеси, k	1- O ₂ , 2- N ₂ , 3- Ar
Цеолитовый адсорбент	13X
Предельный адсорбционный объем W_0 , см ³ /г	0,232
Параметр B , в уравнении Дубинина–Радушкевича, $\times 10^{-6}$, 1/К ²	2,262
Конструктивные параметры:	
Количество адсорберов в установке КЦА	2
Внутренний диаметр обечайки адсорбера D_A^{int} , м	0,05
Длина слоя адсорбента L , м	0,5
Диаметр гранул адсорбента d_{gr} , мм	2,0
Пропускная способность клапанов K_V , л/мин	15
Предельно допустимые значения переменных:	
концентрации кислорода y_1^{out} , об. %	40, 50, 60, 70, 80, 90
производительности установки G^{out} , нл/мин	1, 2, 4, 6, 8
скорости в лобовом слое адсорбента v_g^+ , м/с	0,22
Режимные переменные:	
Длительность стадии адсорбции τ_{ads} , с	0,5–30
Давление на выходе компрессора $P^{in} \times 10^{-5}$, Па	2–6
Коэффициент обратного потока θ , отн. ед.	0–6
Степень открытия клапанов $\psi_\lambda^{in}, \psi_\lambda^{ex}$, $\lambda = 1,2,3, \dots$, отн. ед.	0–1

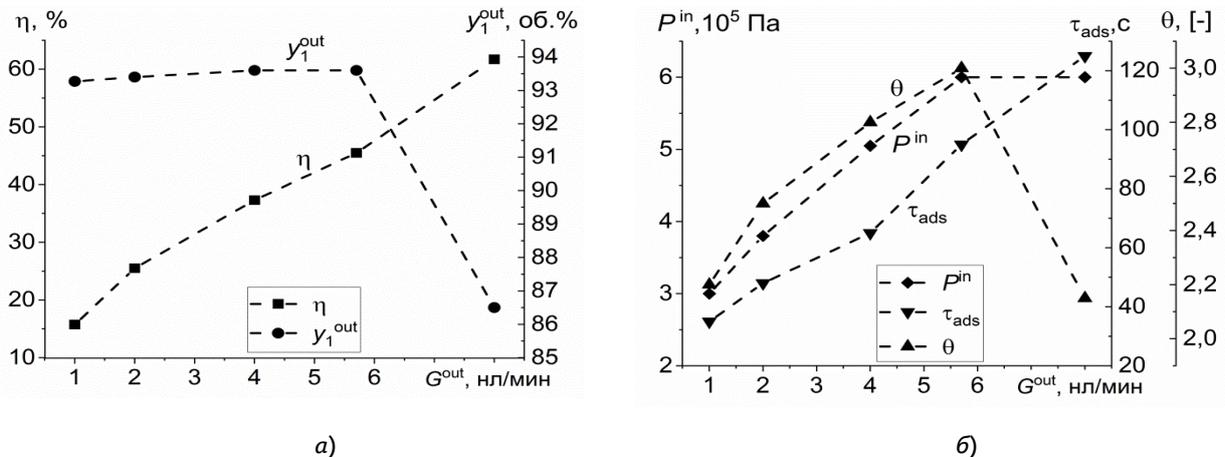


Рис. 1. Зависимости среднего значения степени извлечения (концентрирования) η , концентрации кислорода y_1^{out} (а) и оптимальных режимных переменных (продолжительности τ_{ads} адсорбции, давления P^{in} на выходе компрессора, коэффициента θ обратного потока) функционирования установки КЦА (б) от производительности G^{out} установки КЦА.

гарантированно обеспечить заданные требования по чистоте кислорода и производительности установки независимо от значений, которые принимают неопределенные параметры из заданных интервалов их возможного изменения в процессе эксплуатации установки КЦА.

Увеличение производительности установки КЦА приводит к необходимости увеличения отбора продуктового кислорода (уменьшения коэффициента θ обратного потока) и снижению чистоты кислорода y_1^{out} от 93,6 об. % до 86,5 об. %. При этом повышается среднее значение степени извлечения η

кислорода от 45% до 61%. При повышении производительности установки до 8 нл/мин, требование по чистоте кислорода $y_1^{out} \geq 90$ об. % не выполняется вследствие истощения адсорбционной емкости адсорбента. Анализ графиков на рис. 1а позволяет определить оптимальную производительность установки КЦА – 5,7 нл/мин, при которой обеспечивается максимально возможная степень извлечения η кислорода 45,5% выполнении ограничения по чистоте продуктового кислорода $c_1^{out} \geq 90$ об. %.

Программы изменения во времени степени открытия впускного $\psi_1^{inl,i}(\tau_i), \tau_i \in [0; \frac{\tau_c}{2}]$ клапана 1 и выпускного $\psi_2^{ex,i}(\tau_i), \tau_i \in [\frac{\tau_c}{2}; \tau_c]$ клапана 2 аппроксимировали кусочно- постоянными функциями с количеством ступеней $i = 1, 2, 3, \dots, n$, где $n = 20$.

На рис. 2а,б представлены оптимальные программы открытия впускных и выпускных клапанов установки КЦА (рис. а) и скорости в "лобовом" слое адсорбента (рис. б) для производительности установки 5,7 нл/мин.

Анализ графиков на рис. 2 свидетельствует о том, что при полном скачкообразном открытии впускного и выпускного клапанов (рис. 2, прямые 1, 3) скорость потока в "лобовом" слое адсорбента (рис. 3, кривые 1, 3) превышает предельно допустимую скорость $v_g^+ = 0,22$ м/с газовой смеси (ограничение (5)). Программы ступенчатого (постепенного) открытия клапанов (рис. 2, кривые 2, 4) позволяют обеспечить "безопасную" скорость в "лобовом" слое адсорбента, не превышающую предельно допустимого значения v_g^+ (рис. 3, кривые 2, 4).

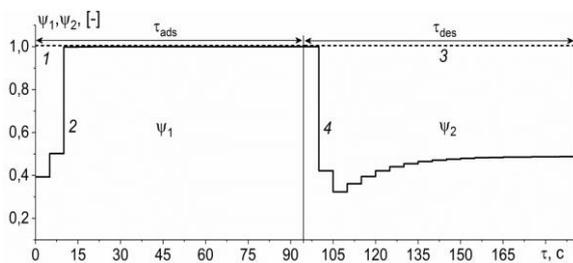


Рис. 2. Программы (степени) открытия впускных (а) и выпускных (б) клапанов в течение одного цикла работы установки: 1, 3 – скачкообразное открытие клапана; 2, 4 – оптимальная программа плавного "осторожного" открытия.

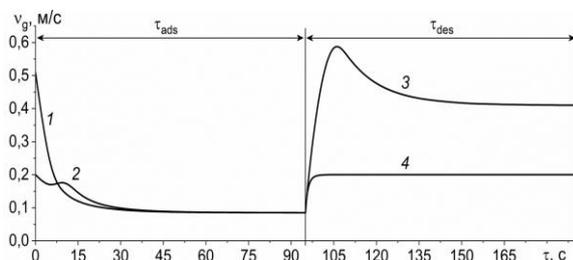


Рис. 3. Скорость газовой смеси в "лобовом" слое адсорбента в течение одного цикла работы установки КЦА: 1, 3 – при скачкообразном открытии клапанов; 2, 4 – при оптимальной программе плавного "осторожного" открытия.

Учет ограничения максимального значения скорости v_g воздуха в "лобовом" слое адсорбента обеспечивает предохранение гранулированного адсорбента от разрушения вследствие аэродинамического удара при полном скачкообразном открытии управляющих клапанов (рис. 3), что способствует увеличению срока службы адсорбента [10,11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулирована задача оптимизации (по критерию степени извлечения продуктового газа) циклических адсорбционных процессов разделения газовых смесей с учетом выполнения регламентных требований по чистоте продуктового газа (кислорода, водорода), производительности установки КЦА и ресурсосбережению гранулированного адсорбента в условиях частичной неопределенности исходных данных (состава, температуры и давления подлежащей разделению газовой смеси, кинетических коэффициентов сорбции, случайные изменения характеристик адсорбента от партии к партии в ходе эксплуатации установки КЦА и др.).

Разработан экономичный итерационный алгоритм решения задачи оптимизации циклических адсорбционных процессов обогащения газовой смеси продуктовым газом в условиях частичной неопределенности исходных данных, позволяющий за 3-5 итераций получить решение задачи оптимизации в условиях неопределенности исходных данных.

На примере решения задачи оптимизации режимных переменных функционирования установки КЦА при обогащении атмосферного воздуха кислородом установлено, что учет неопределенностей позволяет гарантированно обеспечить заданные требования по чистоте концентрируемого кислорода и производительности установки КЦА независимо от значений, которые принимают неопределенные параметры из заданных интервалов их возможного изменения. Однако следует помнить, что учет неопределенностей приводит к снижению степени извлечения η кислорода, в среднем, на $\sim 2\%$ и увеличению энергозатрат установки КЦА на $\sim 10\%$.

Определена оптимальная производительность установки КЦА – 5.7 нл/мин, при которой обеспечивается максимально возможная степень извлечения кислорода 45.5% с чистотой 93.6 об. %. Определены оптимальные программы "осторожного" ступенчатого открытия клапанов, позволяющие

обеспечить "безопасную" скорость в "лобовом" слое адсорбента – не более 0.22 м/с.

Новые научные результаты, постановка задачи оптимизации в условиях неопределенности и разработанный итерационный алгоритм могут быть использованы при про-

ектировании новых автоматизированных процессов и адсорбционных технологических установок с циклически изменяющимся давлением для разделения и очистки многокомпонентных газовых смесей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рачинский, В.В. Введение в общую теорию динамики сорбции и хроматографии / В.В. Рачинский. – Москва: Наука, 1964. – 136 с.–Текст: непосредственный.
2. Ruthven, D.M. Pressure swing adsorption / D.M. Ruthven, S. Farooq, K.S. Knabel. – New York: VCH, 1993. – 189 p.–Текст: непосредственный.
3. To the problem of forming the equation system for pressure swing adsorption mathematical model / O. Golubyatnikov, E. I. Akulinin, S. I. Dvoretzky, D. S. Dvoretzky.–Текст: непосредственный// Chemical Product and Process Modeling. – 2021.– Vol. 17. – No 6.– P. 5-16. – DOI: 10.1515/cppm-2021-0008.
4. Jiang, L. Simulation and optimization of pressure-swing adsorption systems for air separation/ L. Jiang, L.T. Biegler, V.G Fox.– Текст: непосредственный // AIChE J.– 2003.–Vol. 49.–No 5.–P. 1140.
5. Rice R.G., Do D.D. Applied mathematics and modeling for chemical engineers, 2nd Ed. - Wiley , 2012. – 397 p.
6. Пантелеев, А. В. Методы оптимизации в примерах и задачах: учебное пособие / А. В. Пантелеев, Т. А. Летова.–Москва: Высшая школа, 2005.–544 с.–Текст: непосредственный.
7. Реклейтис, Г. Оптимизация в технике: [в 2-х книгах] / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел.–Москва: Мир, 1986.–669 с.–Текст: непосредственный.
8. Химмельблау, Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау. –2 изд.–Москва: Физматлит, 2005.–534 с.–Текст: непосредственный.
9. Ogawa, K. Numerical analysis of O₂ concentration, gas-zeolite temperatures in two zeolite columns for an oxygen concentrator/ K., Ogawa, Y. Inagaki, A. Ohno A.–Текст: непосредственный // Int. J. Heat Mass Transfer.–2019.–Vol. 129.–P. 238.
10. Dowling, A. Large-scale optimization strategies for pressure swing adsorption cycle synthesis / A. Dowling , S. Vetukuri, L. Biegler.– Текст: непосредственный// AIChE J. –2012.–Vol. 58.–No 12. –P. 3777.
11. Arora, A. Optimal synthesis of periodic sorption enhanced reaction processes with application to hydrogen production / A. Arora, I. Bajaj, S Iyer, M. Hasan. – Текст: непосредственный // Comput. Chem. Eng.–2018.–Vol. 115.– P. 89.

REFERENCES

1. Rachinsky, V.V. Introduction to the general theory of sorption dynamics and chromatography / V.V. Rachinsky.– Mosca: Nauka, 1964. – 136 p.
2. Ruthven, D.M. Pressure swing adsorption/ D.M. Ruthven, S. Farooq, K.S. Knabel. – New York: VCH, 1993.– 189 p.
3. To the problem of forming the equation system for pressure swing adsorption mathematical model / O. Golubyatnikov, E. I. Akulinin, S. I. Dvoretzky, D. S. Dvoretzky // Chemical Product and Process Modeling. – 2021. – Vol. 17. – No 6.– P. 5-16. DOI: 10.1515/cppm-2021-0008.
4. Jiang, L. Simulation and optimization of pressure-swing adsorption systems for air separation/ L. Jiang, L.T. Biegler, V.G Fox // AIChE J.– 2003.–Vol. 49.– No 5.– P. 1140.
5. Rice R.G., Do D.D. Applied mathematics and modeling for chemical engineers, 2nd Ed. - Wiley , 2012. – 397 p.
6. Panteleev, A.V. Optimization methods in examples and problems: textbook / A.V. Panteleev, T. A. Letova.– Moscow: Higher school, 2005.– 544 p.
7. Reclitis, G. Optimization in technology: [in 2 books] / G. Reclitis, A. Ravindran, K. Regsdel. – Moscow: Mir, 1986.– 669 p.
8. Himmelblau, D. Applied nonlinear programming / D. Himmelblau.-2 ed.–Moscow: Fizmatlit, 2005.–534 p.

9. Ogawa, K. Numerical analysis of O₂ concentration, gas-zeolite temperatures in two zeolite columns for an oxygen concentrator/ K., Ogawa, Y. Inagaki, A. Ohno A. // Int. J. Heat Mass Transfer.-2019.– Vol. 129. – P. 238.
10. Dowling, A. Large-scale optimization strategies for pressure swing adsorption cycle synthesis / A. Dowling , S. Vetukuri, L. Biegler // AIChE J. -2012.–Vol. 58.–No 12.–P. 3777.
11. Arora ,A. Optimal synthesis of periodic sorption enhanced reaction processes with application to hydrogen production / A. Arora, I. Bajaj, S Iyer, M. Hasan // Comput. Chem. Eng.–2018.–Vol. 115. – P. 89.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, ORCID, Email)
Дворецкий С.И.	д.т.н., профессор,  0000-0002-4352-810X , dvoretsky@yahoo.com
Дворецкий Д.С.	д.т.н., профессор,  0000-0002-7571-3748 , sdvoretsky@mail.tstu.ru
Акулинин Е.И.	д.т.н., доцент,  0000-0003-0848-4380 , akulinin-2006@yandex.ru
Усачев В.Б.	npo@sialuch.ru
Беляев В.А.	npo@sialuch.ru

AUTHORS INFORMATION

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, ORCID, Email)
Dvoretsky S.I.	Dr. Sci, professor,  0000-0002-4352-810X , dvoretsky@yahoo.com
Dvoretsky D.S.	Dr. Sci, professor,  0000-0002-7571-3748 , sdvoretsky@mail.tstu.ru
Akulinin E.I.	Dr. Sci, Associate Professor,  0000-0003-0848-4380 , akulinin-2006@yandex.ru
Usachev V.B.	npo@sialuch.ru
Belyaev V.A.	npo@sialuch.ru

ОБ ОПТИМАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ ЗАПАСАМИ ТОРГОВОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Коковкин Д.А.¹ kokovkin93@mail.ru

¹Тверской государственной технической университет, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22, 170026, Россия, кафедра информационных систем

Аннотация: оптимизация является одним из важнейших этапов в любом бизнесе, которое позволяет улучшить производительность и эффективность предприятия. Сегодня существуют различные методы решения оптимизационных задач, одним из которых является симплекс-метод. Его реализация предполагает решение системы линейных уравнений для нахождения оптимального решения. Одной из оптимизационных задач, которые часто встречаются в бизнесе, является задача об управлении запасами. В задаче, описанной ниже, будет оптимизирован бизнес-процесс закупки товаров, что поможет предприятию сократить производственные затраты, повысив тем самым прибыль. Убытки могут появляться из-за простоя производства, в случае с ненормированными поставками материала; из-за перенасыщения склада товарами (повышение издержек хранения, а также хранение ненужного в данный момент материала); нерассчитанный размер заказа (товар могут заказать в слишком маленьком количестве или в слишком большом) и т.д. Разработка алгоритма расчета оптимального количества товара может существенно повысить эффективность поставок и производства, уменьшить затраты на хранение и устаревание товара. В статье также рассмотрено правило LIFO (last in, first out), которое используется для управления запасами. Оно предполагает, что последний поступивший товар должен быть первым продан. В качестве альтернативы можно применять FIFO (first in, first out) или средневзвешенный метод. Важно учитывать особенности каждого конкретного бизнеса при решении оптимизационных задач. Некоторые методы могут быть более эффективны в определенных ситуациях, в то время как другие методы могут привести к нежелательным результатам. В целом, решение оптимизационных задач является сложным и многогранным вопросом, который требует тщательного исследования и анализа. Однако, использование современных алгоритмов и инструментов может значительно

Ключевые слова: оптимизация запасов, линейное программирование, симплекс-метод, правило LIFO, управление запасами

PRINCIPLES OF TRAJECTORY CONTINUATION IN THE INVENTORY MANAGEMENT SYSTEM OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

Kokovkin D.A.¹ kokovkin93@mail.ru

TverState Technical University (TvSTU), Tver, nab. Afanasia Nikitina, 22, 170026, Russia, Department of Information Systems

Abstract: Optimization is one of the most important steps in any business, which can improve the performance and efficiency of the enterprise. Today there are various methods for solving optimization problems, one of which is the simplex method. Its implementation involves solving a system of linear equations to find an optimal solution. One of the optimization problems that are often found in business is the problem of inventory management. In the problem described below, the business process of purchasing goods will be optimized, which will help the enterprise to reduce production costs, thereby increasing profits. Losses can arise from production downtime, in the case of irregular supply of material; due to oversaturation of the warehouse with goods (increased storage costs, as well as storage of unnecessary material at the moment); unreasonable order size (goods can be ordered in too small or in too large quantities), etc. Development of an algorithm for calculating the optimal quantity of goods can significantly improve the efficiency of supply and production, reduce the cost of storage and obsolescence of goods. The article also discusses the LIFO (last in, first out) rule, which is used for inventory management. It assumes that the last inbound product must be sold first. Alternatively, the FIFO (first in, first out) or weighted average method can be used. It is important to consider the specifics of each particular business when solving optimization problems. Some methods may be more effective in certain situations, while other methods may lead to undesirable results. In general, solving optimization problems is a complex and multifaceted issue that requires careful research and analysis. However, the use of modern algorithms and tools can greatly facilitate this process and improve business efficiency.

Keywords: optimization of inventories, linear programming, simplex method, LIFO rule, inventory management.

ВВЕДЕНИЕ

На многих предприятиях, которые занимаются производством/поставкой определенных товаров, есть много процессов, до-

ступных для оптимизации. Например, можно оптимизировать продажи товаров, тем самым повысив выручку. В задаче, описанной ниже, будет оптимизирован бизнес-процесс закупки

товаров, что поможет предприятию сократить производственные затраты, повысив тем самым прибыль. Убытки могут появляться из-за простоя производства, в случае с ненормированными поставками материала; из-за перенасыщения склада товарами (повышение издержек хранения, а также хранение ненужного в данный момент материала); не рассчитанный размер заказа (товар могут заказать в слишком маленьком количестве или в слишком большом) и т.д.

Такая задача часто представляет собой задачу линейного программирования и для ее решения стандартно используется симплекс-метод, но при этом не учитываются конкретные особенности задачи, однако, если их учитывать, то в нашем конкретном случае уменьшаются вычислительные сложности, алгоритм работает проще и быстрее, не требует большого объема памяти и вычислений. Особенность задачи управления ресурсами состоит в том, что процесс выбора нового плана осуществляется с помощью некоторого стандартного алгоритма и в нашем случае, из-за малого количества вычислений этот алгоритм можно не использовать, проще задействовать правило LIFO. Наша задача состоит в том, чтобы эффективно алгоритмизировать правило LIFO и ввести в исходный алгоритм симплекс-метода [1].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача об управлении запасами может быть представлена в следующем виде:

$$F_1(x_1) + \dots + F_i(x_i) + \dots + F_n(x_n) \rightarrow \max \quad (1)$$

Так же для данной задачи есть ряд ограничений:

$$C_1x_1 + C_2x_2 + \dots + C_ix_i + \dots + C_nx_n = M, \quad (2)$$

$$A_i \leq x_i \leq B_i, \quad (3)$$

где $F(x_i)$ – прибыль от закупленного товара вида i , C_ix_i – стоимость всего закупленного товара вида i , A_i – минимальное количество, доступное для закупки товара вида i , B_i – максимальное количество, доступное для закупки товара вида i , M – бюджет заложенный на закупку [2].

В нашем случае условная функция является линейной, тем самым задача представляет собой задачу:

$$a_1x_1 + \dots + a_ix_i + \dots + a_nx_n \dots \rightarrow \max, \quad (4)$$

при ограничениях (2), (3), где a_i – некоторые действительные числа. Смысл этих чисел состоит в том, что они представляют собой стоимость единицы товара с накруткой

$$a_i = c_iz_i,$$

где z_i – коэффициент, характеризующий прибыль от продажи единицы данного товара.

При реализации алгоритма решения нашей задачи мы будем использовать правило LIFO, поэтому приведем краткое описание этого правила [3].

ПРАВИЛО LIFO

LIFO (англ. last in, first out, «последним пришёл – первым ушёл») – способ организации и манипулирования данными относительно времени и приоритетов. В структурированном линейном списке, организованном по принципу LIFO, элементы могут добавляться и выбираться только с одного конца, называемого «вершиной списка». Структура LIFO может быть проиллюстрирована на примере стопки тарелок: чтобы взять вторую сверху, нужно снять верхнюю, а чтобы снять последнюю, нужно снять все лежащие выше [4].

Термин относится к абстрактным принципам обработки списков и временного хранения данных, в частности, когда нужно иметь доступ к ограниченному набору данных в определённом порядке. Принцип LIFO применяется в тех случаях, когда последние данные, добавленные в структуру, должны быть первыми удалены или обработаны.

Применительно к нашей задаче правило LIFO выражается следующим образом. При описании симплекс-метода шла речь о проблеме выбора нового опорного плана, который является достаточно сложной вычислительной процедурой. Специфика нашей задачи состоит в том, что в ней мало ограничений типа равенств и они простые, поэтому нет необходимости применять процедуру выбора направления куда двигаться наилучшим образом. Гораздо проще и быстрее перебрать все вершины многогранника, т.е. если мы оказались в какой-то вершине, и оказалась что величина $d < 0$, мы берем следующую попавшуюся вершину, решая соответствующую систему линейных уравнений [5].

АЛГОРИТМ

Начальная вершина формируется следующим образом: делаем $n - 1$ ограничение активным. Задача принимает следующий вид:

$$a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_ix_i + \dots + a_nx_n \dots \rightarrow \max,$$

$$C_1x_1 + C_2x_2 + \dots + C_ix_i + \dots + C_nx_n = M$$

$$x_1 = A_1$$

$$x_2 = A_2$$

$$x_{n-1} = A_{n-1}$$

Итак, на подготовительном этапе перебираем все возможные варианты с $n - 1$ активным ограничением. В результате получаем все вершины и запоминаем их координаты [6,7].

С помощью алгоритма берем последовательно первую попавшуюся вершину и проверяем является ли она оптимальной или нет. Блок схема алгоритма представлена на рис. 2

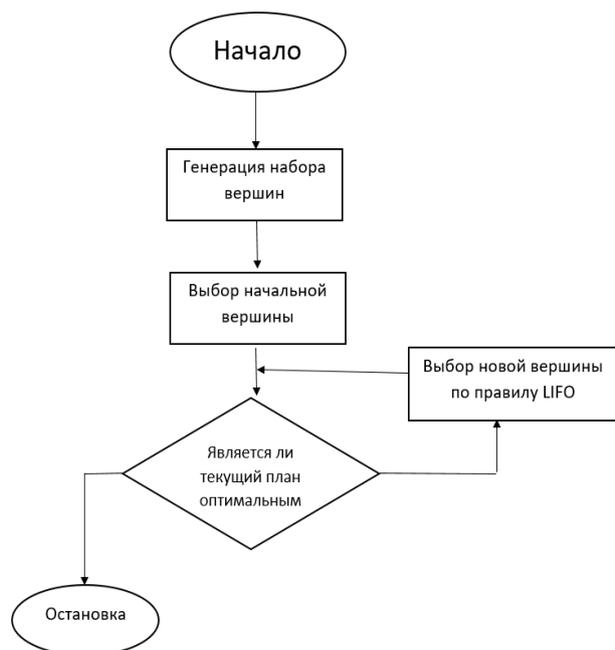


Рисунок 2. Блок схема алгоритма решения задачи

На начальном этапе выбирается начальный план, набор вершин задается с помощью генератора случайных чисел, затем проверяется является ли текущий план оптимальным или нет, если нет – происходит вычисление нового плана, с помощью того же генератора LIFO и так далее, проверяется годится этот план или нет. В результате первого этапа находятся все вершины и поочередно записываются в стек, начинается второй этап, вершины берутся в обратном порядке [2].

Данную задачу можно решить вручную, методом перебора вариаций закупки товаров. Но, к примеру, на производстве видов товара может быть более 10, тогда вариаций будет 10! (то есть факториал десяти, а это 3628800 вариаций). Разработанный метод можно легко реализовать при помощи стандартных средств Microsoft Office и без труда устанавливается на стандартный персональный компьютер со стандартным программным обеспечением. Данную задачу можно решить посредством программного обеспечения Microsoft Office Excel с помощью

надстройки «Поиск решений». Для этого необходимо внести в таблицу исходные данные: минимальные и максимальные значения закупки для каждого вида товара, стоимость закупки каждого вида товара, выделенный бюджет и значения коэффициентов, характеризующих прибыль от продажи единицы данного товара. Так же нужно определить ячейки, куда надстройка поместит итоговые значения (это будет количество, рекомендуемое для закупки по каждому виду товара)[8]. В отдельную ячейку необходимо прописать целевую функцию (то есть прописать формулу суммирования произведений стоимости на количество). В произведении использовать в качестве количества выделенные ранее ячейки. Далее необходимо запустить надстройку «Поиск решений». В поле «Установить целевую ячейку» указать ячейку, куда была занесена целевая функция. Далее нужно выбрать чтобы функция была равна максимальному значению. В поле «Изменяя ячейки» выбираем выделенные для количества ячейки. Далее необходимо прописать ограничения. Для каждой ячейки с количеством товара необходимо установить следующие ограничения: найденное значение (ячейка) должно быть целым, значение не может быть меньше минимального количества для закупки (значение А для каждого вида товара), значение не может быть больше максимального количества для закупки (значение В для каждого вида товара)[9]. Так же необходимо установить ограничение для самой функции: найденное значение функции не может превышать выделенный бюджет (значение М). После этого необходимо выполнить поиск решений. После завершения работы надстройки в ячейках появится оптимальное количество для закупки каждого вида товара. Из данного количества с помощью стандартной функции произведения легко найти общую стоимость закупки каждого вида товара и соответственно посчитать прибыль[10].

ВЫВОДЫ

Таким образом, экспериментальные данные подтверждают результаты математического моделирования. Проведенные исследования и их сопоставление с данными натурального эксперимента показали, что до достижения определенной частоты вращения и времени обработки температура изменяется линейно во времени и её значение через заданное время обработки пропорционально квадрату скорости движения стенки. При

этом поле температур является практически однородным, что позволяет не учитывать распределение температуры в математической модели динамики изменения вязкости в ходе процесса термомеханодеструкции.

Математическая модель (1-8) позволяет качественно и количественно описывать динамику температуры эластомера в ходе механической обработки в заданном диапазоне

режимных параметров. Однако для учета механизма разрушения структуры и вызванное этим снижение вязкости, необходимо дополнительно ввести в структуру математической модели зависимость вязкости эластомера от времени механической обработки. Это позволит учесть снижение механических напряжений и соответствующее снижение интенсивности диссипативного нагрева.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов, Г.Д. Решение задач линейного программирования приведением к виду с очевидным ответом / Г.Д. Степанов.–Текст: непосредственный // Моделирование и анализ информационных систем. –2021.–№4 С. 434–451.
2. Поляк, Б.Т. Введение в оптимизацию. – Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983.– 384 с. – Текст: непосредственный.
3. Антипин, А.С. Линейное программирование и динамика / А.С. Антипин, Е.В. Хорошилова. – Текст: непосредственный // Тр. ИММ УрО РАН.– 2013.– № 2.– С.7–25.
4. Кутателадзе, С.С. Линейное программирование и K -пространства / С.С. Кутателадзе.–Текст : непосредственный // Сибирский журнал индустриальной математики.– 2007.– №1.– С 115–119.
5. Антипин, А.С. Функция чувствительности, ее свойства и приложения/ А.С. Антипин, Е. В. Хорошилова. – Текст: непосредственный // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2020 – № 12–С. 177–196.
6. Степанов, Г.Д. Решение задач линейного программирования приведением к виду с очевидным ответом / Г. Д. Степанов. – Текст: непосредственный // Моделирование и анализ информационных систем.– 2021.– № 4 .– С.434–451.
7. Технология раскрытия темы "Симплекс-метод решения задачи линейного программирования"/ В.И. Самарин, А.М. Игнатенко, И.Л. Макарова, Н.Ф. Якунина. – Текст: непосредственный // Вопросы гуманитарных наук. – 2016.– № 2.– С. 118–126.
8. Колосов, В. С. Метод последовательной активации ограничений в линейном программировании / В. С. Колосов.–Текст: непосредственный // Прикладная дискретная математика. – 2018.– № 41 – С. 110–125.
9. Г. И. Забиняко, Г.И. Алгоритм симплекс-метода с использованием двойного базиса / Г. И. Забиняко.– Текст: непосредственный // Сибирский журнал вычислительной математики. – 2015. – № 4 .– С. 349 – 359.
10. Лаптева, М.В. Решение задачи по максимизации прибыли в АО "Караван" с использованием симплекс-метода / М.В. Лаптева, Д.А. Сергеева, Э.О. Иремадзе. – Текст: непосредственный // Colloquium-Journal. – 2019.– № 5.– С. 56 – 57.

REFERENCES

1. Stepanov, G.D. Solution of linear programming problems by reduction to the form with an obvious answer / G.D. Stepanov // Modeling and analysis of information systems. – 2021.– No 4.– P. 434 – 451. (in Russian)
2. Polyak, B.T. Introduction to Optimization.–Moscow : Nauka. Main Editorial Office of Physical and Mathematical Literature, 1983. – 384 p. (in Russian)
3. Antipin, A.S. Linear programming and dynamics / A.S. Antipin, E.V. Khoroshilova. - Tr. IMM UB RAS. – 2013. – No 2. – Pp.7 – 25. (in Russian)
4. Kutateladze, S.S. Linear programming and K -spaces / S.S. Kutateladze // Siberian Journal of Industrial Mathematics.– 2007.–No 1.– P. 115–119. (in Russian)
5. Antipin, A. S. Sensitivity function, its properties and applications / A. S. Antipin, E. V. Khoroshilova. // Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2020 – No 12 . – P. 177–196. (in Russian)
6. Stepanov, G.D. Solution of linear programming problems by ghosting to the form with an obvious answer / G.D. Stepanov // Modeling and Analysis of Information Systems.–2021.– No 4 .– P. 434–451. (in Russian)

7. Technology of disclosing the topic "Simplex-method for solving the problem of linear programming" / V.I. Samarin, A.M. Ignatenko, I.L. Makarova, N.F. Yakunina // Voprosy humanitarnykh nauk. - 2016. - No 2. - P. 118-126. (in Russian)
8. Kolosov, V. S. The method of sequential activation of constraints in linear programming / V. S. Kolosov // Applied discrete mathematics. - 2018. - No 41 - P. 110 - 125. (in Russian)
9. G. I. Zabinyako, G. I. Algorithm of the simplex method using a double basis / G. I. Zabinyako // Siberian Journal of Computational Mathematics. - 2015. - No 4. - P. 349-359. (in Russian)
10. Lapteva, M.V. The solution of the problem of profit maximization in JSC "Caravan" using the simplex method / M.V. Lapteva, D.A. Sergeeva, E.O. Iremadze // Colloquium-Journal. - 2019. - No 5. - P. 56 - 57. (in Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ФИО	Сведения (<i>Email</i>)
Кокочкин Д.А.	Kokovkin93@mail.ru

AUTHORS INFORMATION

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, ORCID, <i>Email</i>)
Kokovkin D.A.	Kokovkin93@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ ЭТАПА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ В НЕЙРОСЕТЕВЫЕ АЛГОРИТМЫ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ СИСТЕМ МОБИЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Пономарев А.В.	1	-		cycloida@mail.ru
Богословский А. В.	1	-	 0000-0002-2008-717X ,	p-digim@mail.ru
Жигулина И. В.	1	-		ira_zhigulina@mail.ru
Пономарев Н.А.	1	-		cycloida@mail.ru

¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ул. Старых Большевиков, 54а, г. Воронеж, 394064, Россия, кафедра радиоэлектроники, научно-исследовательского центра информационный и образовательных технологий

Аннотация: работа посвящена проблеме снижения вычислительных затрат при решении задач автоматического анализа видеоданных в системах технического зрения мобильных объектов, где входной видеоряд представляется многомерным тензором и требует колоссального количества операций при работе нейросетевых алгоритмов. В статье рассматривается бионический подход к обработке видеoinформации, базирующийся на том, что в живой природе противоречие между необходимостью обработки огромных массивов информации за ограниченное время и малым объемом потребляемой зрительной системой энергии решается вынесением части обработки на сетчатку глаза. Приведена архитектура неокогнитрона, где слой выделения контраста моделирует работу сетчатки глаза и отражает такую особенность её строения, как наличие рецептивных полей ганглиозных клеток. Установлено отсутствие в иерархической структуре сверточных нейронных сетей этапа, подобного этапу обработки на сетчатке глаза в зрительной системе. Поэтому структуру нейросети предложено дополнить этапом предварительной обработки видеoinформации, базой которого является использование двухзонных структур (детекторов), образующих детекторные поля. Детекторные поля, прообразом которых являются рецептивные поля сетчатки глаза, реализованы в виде модулей обработки данных для выделения наиболее значимых структурных элементов изображения или видеопоследовательности. Само детекторное поле представляет собой совокупность двухзонных структур, которые могут образовывать перекрытия и варьироваться в размерах. Выделение наиболее значимых структурных элементов обусловлено реакцией детектора на контраст. Для сохранения целостности границ объектов в выходном представлении предложена реализация механизма дрейфа детекторных полей путем последовательного смещения слоя относительно входного изображения, что дополнительно обеспечивает существенное уменьшение размерности массива данных на выходе слоя. Разработан вариант архитектуры нейронной сети с детекторным полем, решающей задачи множественной классификации и обеспечивающей снижение вычислительной нагрузки систем мобильных объектов.

Ключевые слова: детекторное поле, обработка изображений, нейронные сети, мобильные объекты

INTRODUCING THE STAGE OF PRELIMINARY DETECTION OF VIDEO INFORMATION INTO NEURAL NETWORK ALGORITHMS TO REDUCE THE COMPUTATION LOAD OF MOBILE OBJECT SYSTEMS

Ponomarev A.V.	1	-		cycloida@mail.ru
Bogoslovsky A.V.	1	-	 0000-0002-2008-717X ,	p-digim@mail.ru
Zhigulina I.V.	1	-		ira_zhigulina@mail.ru
Ponomarev N. A.	1	-		cycloida@mail.ru

¹Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, st. Starykh Bolshevikov, 54a, Voronezh, 394064, Russia, Department of Radio Electronics, Research Center for Information and Educational Technologies

Abstract: the work concentrates on the problem of reducing computational costs when solving problems of automatic analysis of video data in the systems of technical vision of mobile objects. The input video sequence in the systems is represented by a multidimensional tensor and requires a huge number of operations when working with neural network algorithms. The article studies the bionic approach to video information processing. It is based on the fact that in wildlife, the contradiction between the need to process huge amounts of information in a limited time and the

small amount of energy consumed by the visual system is solved by transferring part of the processing to the retina. The architecture of the neocognitron is presented: the contrast enhancement layer simulates the work of the retina and reflects a feature of its structure – the presence of receptive fields of ganglion cells. It has been established that the stage convolutional neural networks are absent in the hierarchical structure. This stage is similar to the stage of processing on the retina in the visual system. Therefore, it is proposed to supplement the structure of the neural network with the stage of preliminary processing of video information. The basis of it is the use of two-zone structures (detectors) that form detector fields. Detector fields, the prototype of which are retinal receptive fields, are implemented as data processing modules. That is to highlight the most significant structural elements of an image or video sequence. The detector field itself is a set of two-zone structures that can form overlaps and vary in size. The selection of the most significant structural elements is due to the reaction of the detector to the contrast. To preserve the integrity of the boundaries of objects in the output representation, the implementation of the drift mechanism of the detector fields is proposed by means of a plane-sequential displacement of the layer relative to the input image. Additionally, it provides a significant reduction in the dimension of the data array at the output of the layer. A variant of the architecture of a neural network with a detector field has been developed. It solves the problem of multiple classification and provides a reduction in the computational load of systems of mobile objects.

Key words: detectors field, image processing, neural networks, mobile objects.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большее количество крупнейших проектов и достижений связано с интеллектуализацией решаемых задач. Мы находимся на очередной волне подъема интереса к методам, способным реализовать некоторые элементы искусственного интеллекта. Ранее аналогичные подъемы уже наблюдались, они были связаны с развитием символического искусственного интеллекта и реализацией экспертных систем. В последние годы исследования в области искусственного интеллекта продвигались достаточно быстро, во многом благодаря возможности реализации на существующих аппаратных мощностях алгоритмов машинного обучения. Системе на начальном этапе передаются многочисленные примеры, имеющие непосредственное отношение к конкретной решаемой задаче, в результате чего система формирует признаки на основе выявляемой статистической структуры, которая и позволяет выработать правила для автоматического решения задачи. Новым подходом представления данных в машинном обучении, базирующемся на поэтапном (многослойном) изучении все более значимых представлений, стало глубокое обучение. Появились заметные успехи в моделировании процессов восприятия – зрения и слуха, что позволяет вводить в технические системы автоматические и автоматизированные режимы работы. Таким образом, решение задачи любой сложности ограничивается лишь достаточным количеством адекватных примеров (объектов для обучения) и имеющимися вычислительными ресурсами. Оба эти обстоятельства имеют принципиальное значение. Так, для колоссального количества актуальных на данный момент задач невозможно добыть требуемый объем обучающей

выборки, например, для задач разведки в военной области, ряда направлений медицины, сейсмологии и т.д. Более значимым ресурсом являются потребные вычислительные мощности. Если представить действующий искусственный интеллект на схожем с интеллектом человека уровне, то только потребляемая энергия для обеспечения работы вычислителей будет измеряться масштабами потребления энергии нескольких больших городов. Примерами могут служить ChatGPT и дата-центры Google и Facebook [1, 2].

Последнее обстоятельство является сдерживающим фактором развития мобильных объектов, использующих интеллектуальные системы без доступа к распределенным вычислительным системам или к локальным вычислительным кластерам [3]. Для мобильных объектов важной является задача распознавания образов, поскольку им характерна смена окружающей обстановки, и для автоматического выполнения действий необходима реализация методов обработки изображений, а точнее кадров видеопоследовательности. К сожалению, ожидания превысили реальные достижения, и говорить о полноценном автоматическом анализе видеоданных с выдачей соответствующих решений в мобильном объекте не приходится. Например, для беспилотных летательных аппаратов до сих пор требуется управление оператором, и на их борту не производится автоматический анализ видеоданных для принятия решений на применение оружия. Это объясняется тем, что нет эффективных решений, позволяющих обойти так называемое «проклятие размерности», т.е. зависимость количества потребных операций и качества обработки от объема входных данных. Входной видеоряд в алгоритмах обработки представляется многомерным тензором [4]

и требует колоссального количества операций для получения сведений о его содержимом любым из известных методов.

Очевидно, что зрительная система человека обладает возможностями пока недостижимыми для технических систем, например, по таким характеристикам, как спектр решаемых задач, масса, габаритные размеры, потребляемая энергия. В живой природе противоречие между необходимостью обработки огромных массивов информации за ограниченное время и малым объемом потребляемой энергией зрительной системой решается вынесением части обработки на сетчатку глаза [5-7].

Роль сетчатки глаза недооценена в модели, где основная обработка осуществляется на этапах, соответствующих этапам обработки информации в зрительной коре головного мозга. Известно, что сетчатка совместно с механизмом произвольных движений осей глаз образуют мощную систему обработки информации, поступающей по зрительному каналу [8-13]. Сетчатка глаз считается частью мозга, вынесенной на периферию [6, 14-17], и выполняет функции предобработки. Предполагается, что на сетчатке выделяются объекты, имеющие определенные размер и форму, обнаруживаются движущиеся объекты и определяются параметры их движения, осуществляется адаптация к освещенности, компенсируется влияние помех и т.д. [18].

Считается, что благодаря наличию обработки информации на сетчатке, мозг человека имеет вполне приемлемые размеры и потребляемую энергию [14, 15]. Введение подобной предварительной обработки видеoinформации может привести к значительному снижению потребляемой мощности, вычислительных ресурсов средств автоматизации, а также их массогабаритных размеров, что особенно актуально для мобильных комплексов и роботизированных систем.

Целью статьи является исследование возможности повышения эффективности анализа видеoinформации путем реализации механизмов зрительного анализатора на этапе предварительной обработки в нейросетевых алгоритмах.

БИОНИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Наиболее удачные алгоритмы обработки изображений, которые обеспечивают обработку видеoinформации в реальном масштабе времени и реализованы в технических системах, обязаны своим появлением исследованиям в области физиологии зрения. К

таким алгоритмам и технологиям относятся, например, масштабно-инвариантная трансформация признаков (SIFT), ускоренные устойчивые признаки (SURF) и, конечно, нейронные сети [19-22].

Сами нейронные сети не являются чем-то новым, основные идеи нейронных сетей в упрощенном виде были исследованы еще в 1950-х годах. Долгое время развитие этого направления тормозилось из-за отсутствия эффективного подхода к обучению больших нейронных сетей и отсутствия соответствующих вычислительных возможностей. Знаковым событием в развитии нейронных сетей следует считать появление первых вычислительных моделей в 1980-х годах, основанных на иерархической организации зрительной системы приматов, известных как «неокогнитрон Фукусимы». Наиболее полная архитектура неокогнитрона представлена на рис. 1 [23].

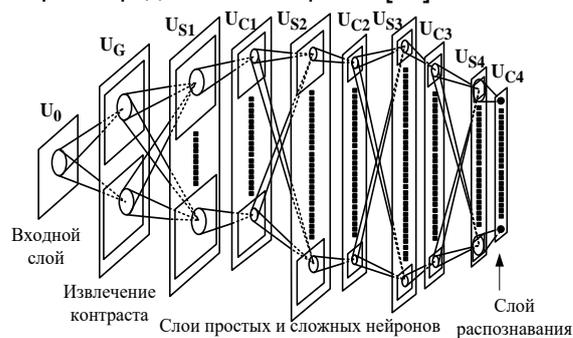


Рис. 1. Архитектура неокогнитрона

Неокогнитрон состоит из U_S слоев простых элементов или нейронов (simple-элементов) и U_C слоев сложных элементов (complex-элементов), расположенных последовательно друг за другом и образующих иерархическую структуру, т.е. несколько уровней, соединенных в сеть. Слои U_S с переменными связями выделяют признаки, слои U_C обеспечивают инвариантность относительно позиции маски. По мере прохождения данных от слоя к слою возрастает степень абстракции, что обеспечивает устойчивость к искажениям, положению объектов на изображении и, в какой-то степени, инвариантность к масштабу. Нейроны выходного слоя выполняют окончательное инвариантное распознавание. Такая идея о последовательности слоев U_S , U_C была позаимствована из работ Д. Хьюбела и Т. Визеля (1959 г.), которые описали, что в первичной зрительной коре существует два вида каскадно-расположенных клеток: простые и сложные клетки.

Ценность этой модели состоит в том, что, исходя из известных на тот момент данных о работе зрительной системы, она максимально точно передает особенности и этапы обработки видеoinформации. Даже сканирующее изображение окно (чувствительная область) смоделировано по аналогии со зрительным анализатором, т.е. имеет круглую форму.

Обращает на себя внимание слой U_C – слой выделения контраста, который появился в архитектуре неокогнитрона гораздо позже его первых представлений. Он является попыткой моделировать работу сетчатки глаза, которая является частью зрительной системы.

Слой U_C формирует нулевые выходные значения, если входной слой U_0 формирует значения постоянной величины. Его модель отражает одну особенность строения сетчатки глаза, а именно, наличие рецептивных полей ганглиозных клеток, объединенных в «*on-off*» или «*off-on*»-центры. Эти центры работают по антагонистическому принципу действия центральной и периферийной областей. Если засвечена центральная область «*on-off*»-центра,

то он возбуждается, а если периферийная – тормозится. Действие «*off-on*»-центра – противоположное. Если засвечена область всего центра вне зависимости от его типа, то происходит торможение. Каждая ганглиозная клетка суммирует возбуждение, возникающее в большом числе входных клеток. Ганглиозные клетки реагируют активно только на изменение освещенности, при постоянной освещенности обнаруживается небольшая активность. Образующая противоположность между центром и периферией приводит к тому, что если засвечивается одновременно центральная область и периферия, то «*on-off*»-реакции стремятся скомпенсировать друг друга. Диффузный свет, падающий на все поле, вызывает очень слабый ответ [8].

Концепция иерархической структуры обработки информации, схожая с обработкой информации на участке зрительной коры головного мозга, была реализована канадским исследователем Яном ЛеКуном в его сверточной нейронной сети [24], состоящей из значительного количества последовательных слоев (рис. 2).

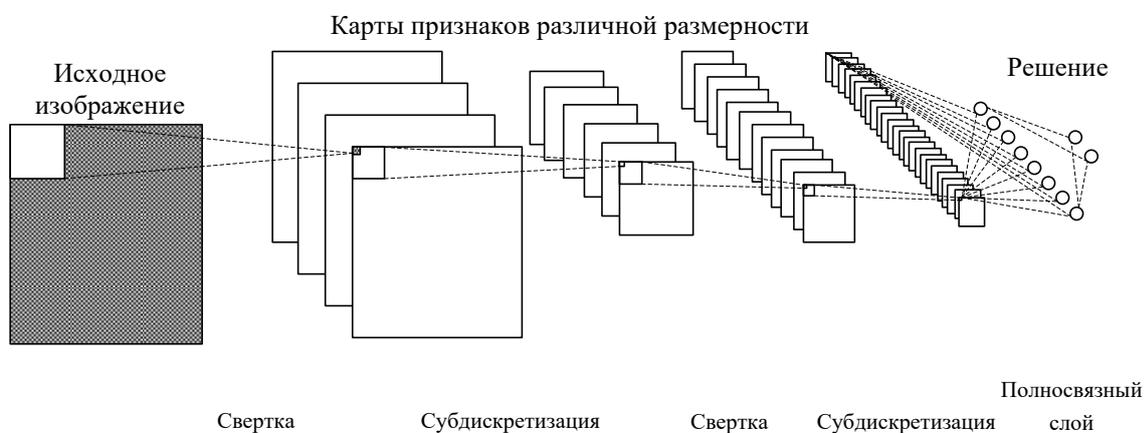


Рис. 2. Стандартная архитектура сверточной нейронной сети

В сверточной нейросети после входного слоя (входного изображения) следует серия последовательных слоёв, в которых чередуются операции свёртки и субдискретизации («пулинга» или «подвыборки»). Слой – это модуль обработки данных, принимающий на входе и возвращающий на выходе один или несколько тензоров. Такая последовательность слоев позволяет получать массивы признаков, которые на каждом следующем слое уменьшаются в размере, но увеличивается количество каналов обработки, что обеспечивает способность распознавания сложных иерархий признаков. После нескольких слоев массивы признаков представ-

ляют собой вектор или вырождаются в скаляр. На выходе сети вводятся полносвязные слои («перцептрон»), где и заканчивается обработка признаков.

Применяя к обработке изображений сверточные нейронные сети, удается на необходимых вычислительных мощностях обеспечить классификацию изображений в реальном масштабе времени, в том числе за счет операций субдискретизации. Однако отсутствие в модели этапа, подобного этапу обработки на сетчатке глаза в зрительной системе, смещает фокус от эффективности алгоритмов в сторону завышения требований к аппаратным ресурсам. Например, требуются мощные

графические процессоры с обязательным применением программных интерфейсов, допускающих возможность массового распараллеливания вычислений, начиная с физического моделирования.

К важным функциям зрительной системы на этапе предварительной обработки изображений сетчаткой глаза, которые, как правило, не берутся в рассмотрение при реализации методов обработки информации, можно отнести:

1. Сжатие данных. По оценкам поток информации, поступающий на сетчатку глаза, составляет порядка 10 Гбит/с, покинуть ее может только 6 Мбит/с, а реально поступает в зрительную кору мозга поток порядка 10 кбит/с [16, 25].

2. Непроизвольные движения глаз. Глаза осуществляют различного вида движения, которые человек не контролирует: тремор, большие и малые саккады, дрейф и т.п. Известно, что неподвижный глаз ничего не видит [26].

3. Перекрытие «on-» и «off-» центров сетчатки глаза и ее неоднородная по пространству структура с высоким разрешением в центре, уменьшающимся к краям поля зрения. Тем самым обеспечивается высокая детализация входной информации при компактных размерах и малых энергетических затратах самой зрительной системы.

Перечисленные особенности зрительной системы необходимо учитывать и при реализации технических систем, тогда на этапе предварительной обработки можно добиться снижения обрабатываемого потока информации на несколько порядков при высоком быстродействии решаемых задач, связанных с обнаружением объектов на изображениях или видеопоследовательностях.

ПРИМЕНЕНИЕ ДЕТЕКТОРНЫХ ПОЛЕЙ НА ЭТАПЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ В НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Известен подход к выделению объектов на изображении путем двумерной дискретной фильтрации, при котором количество операций вычисления значений функции автокорреляции снижается за счет использования детекторных полей, уменьшающих размерность входных данных [27].

Для решения задач распознавания изображений, так и видеопоследовательностей возможно применение детекторных полей на этапе предварительной обработки в сверточной нейронной сети. При этом детек-

торное поле реализуется в виде модуля обработки данных для выделения наиболее значимых структурных элементов изображения. Характерной особенностью такой вычислительной среды будет являться уменьшение размерности обрабатываемого изображения (или кадра видеопоследовательности).

Само детекторное поле представляет собой совокупность двухзонных структур (детекторов), которые могут образовывать перекрытия и варьироваться в размерах. Прототипом детекторных полей являются рецептивные поля сетчатки глаза [8]. Размерность всего детекторного поля соответствует размерности входного изображения, например, $(2M + 1)(2N + 1)$ (рис. 3).

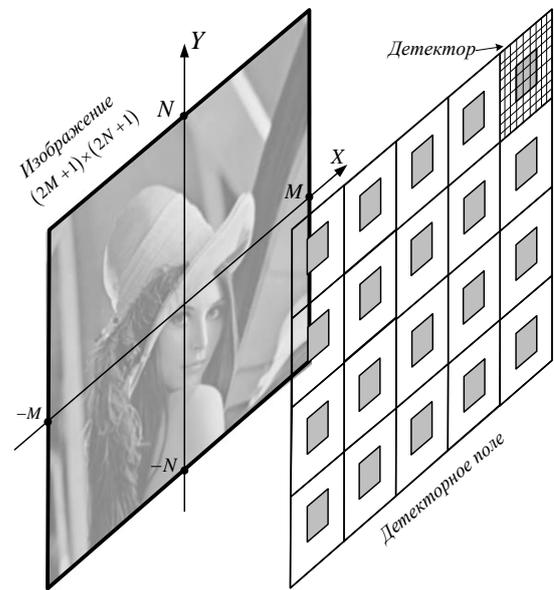


Рис.3. Структура детекторного поля

Детекторное поле состоит из однотипных двухзонных элементов – чувствительных областей, структура которых подобна «on-off» или «off-on» центрам сетчатки, работающим на принципах возбуждения и торможения. В случае детекторного поля это учитывается знаком отклика центральной Z_c и периферийной Z_p областей (рис. 4).

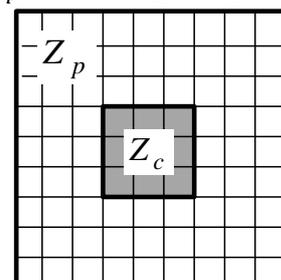


Рис.4. Двухзональная структура детектора

Положению каждого отдельного детектора внутри поля будет соответствовать неко-

торый участок входного изображения, т.е. можно говорить о размерах $t \times t$ для чувствительной области Z_c (при размерах всего детектора $3t \times 3t$).

Чтобы реакция на уровень яркости изображения в пределах чувствительной области была аналогична реакции «on-off» или «off-on» центров сетчатки, необходимо учесть различное количество пикселей, соответствующих центральной и периферийной зонам.

Две зоны в пределах каждого детектора должны уравновешивать друг друга, что, в частности, соответствует наличию нулевого значения при однородной яркости участка изображения, поэтому значение на выходе слоя, переданное (i, j) -ым детектором вычисляется следующим образом:

$$\theta_{ij} = \sum_{(l,v) \in Z_p} f_{lv} - 8 \sum_{(l,v) \in Z_c} f_{lv}, \quad (1)$$

где f_{lv} – отсчеты видеосигнала изображения либо отсчеты яркостей его пикселей; $l \in [-M; M]$, $v \in [-N; N]$. Коэффициент «8» обеспечивает необходимый вес для элементов,

соответствующих центральной зоне чувствительной области.

Таким образом, устанавливаются определенные связи детекторного поля с входным изображением: в результате слой выделяет локальные представления, применяя одни и те же преобразования к разным участкам (фрагментам) входного изображения. Сформированный на выходе слоя массив будет иметь гораздо меньшую размерность $\left[\frac{2M+1}{3m}\right] \times \left[\frac{2N+1}{3m}\right]$. В нем будут выделены наиболее значимые структурные элементы входного изображения для формирования необходимых признаков на последующих этапах обработки сверточной сети. Выделение наиболее значимых структурных элементов входного изображения обусловлено реакцией детектора на перепад освещенности или, точнее, на контраст изображения.

Рассмотрим пример, когда в пределах чувствительной области имеется двумерный видеосигнал величиной a и b (рис.5).

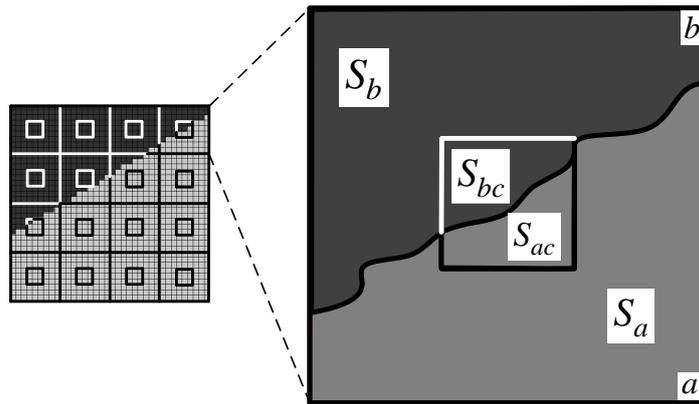


Рис.5. Положение границы контраста относительно детектора

Реакцию детектора можно описать не через отсчеты видеосигнала изображения по выра-

жению (1), а через площади частей детектора, занимаемые сигналами различной величин:

$$\theta = (S_b - 9S_{bc})b + (S_a - 9S_{ac})a = (b - a)(S_b - 9S_{bc}) = (a - b)(S_a - 9S_{ac}) \quad (2)$$

где S_b и S_a – площади частей всего детектора, занимаемые сигналами величиной b и a , соответственно; S_{bc} и S_{ac} – площади в центральной области детектора, занимаемые сигналами b и a , соответственно.

Из (2) следует, что детектор реагирует не только на контраст $\Delta = b - a$, но и на положение перепада яркости на поле детектора.

Таким образом, одномоментное представление на выходе слоя обеспечивает сведение отдельных реакций каждой из чувствительных областей в единый массив данных.

На рис. 6а приведен фрагмент детекторного поля, состоящий из шестнадцати детекторов, который взаимодействует с участком изображения размером 36×36 пикселей. Темная область соответствует $b = 50$, светлая – $a = 200$. Реакция детекторов показана на рис. 6б. По ее величине и знаку можно судить о прохождении границы освещенности на изображении. Передаваемые на следующий этап обработки данные можно уже описать массивом гораздо меньшей размерности (в данном случае 4×4 элемента).

Сокращение массива данных за счет операции свертки в пределах чувствительной области может приводить к потере информа-

ции о некоторых границах освещенности, формах объектов или даже их наличии.

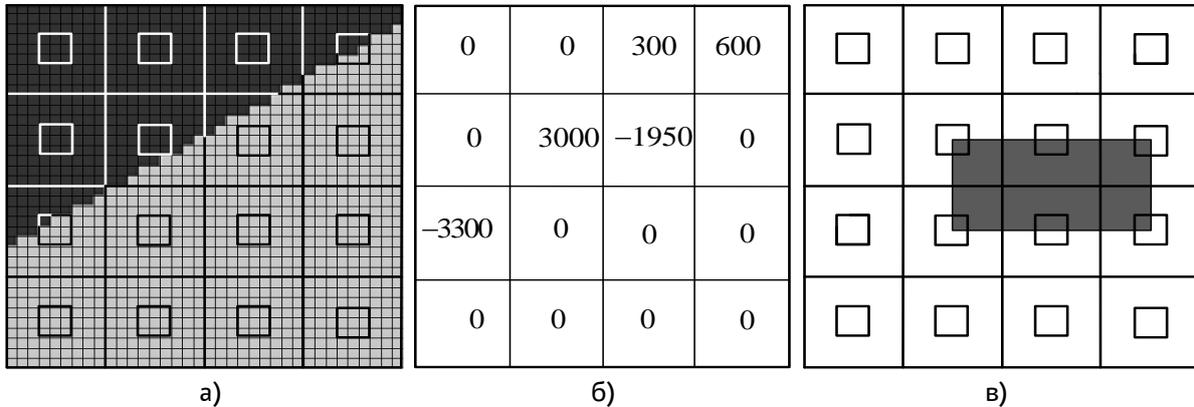


Рис. 6. Фрагмент детекторного поля (а), его реакция (б) и случай пропуска границы (в)

Это связано с тем, что реакция детектора может быть нулевой не только при его полной освещенности, но и когда уравниваются площади частей детектора, попадающие под различные освещенности. Подобный случай представлен на рис. 6в, где информация об объекте полностью пропадет на выходе слоя, т.к. для всех детекторов выполняется условие:

$$(S_b - 9S_{bc}) = (S_a - 9S_{ac}) = 0. \quad (3)$$

В зрительной системе человека такая проблема решается за счет произвольного движения глаз типа «дрейф» по некоторой гладкой кривой. Механизм дрейфа в зрительном анализаторе человека необходим для выделения тонких границ. Глаз, совершая микроперемещения по дугообразной кривой, обеспечивает поступательное смещение изображения, а следовательно, и выделяемых границ в пределах нескольких рецептивных полей. Данное обстоятельство обеспечивает постоянную видимость границ объектов, независимо от их ориентации [28].

Для детекторных полей, применяемых в нейронных сетях, «дрейф» можно реализовать путем плоско-последовательного смещения слоя относительно входного изображения программным способом, изменяя координаты по вертикали и горизонтали с осуществлением выборок в пределах подвижных чувствительных областей. При этом полностью удастся устранить негативный эффект, возникающий, когда справедливо выражение (3).

Величина смещения слоя является варьируемым параметром. Однако для исключения избыточности получаемых данных и обеспечения максимальной достоверности передава-

емых представлений на следующий этап обработки, следует учесть, что рецептивные поля ганглиозных клеток сетчатки глаза одного и того же типа не перекрываются в центральной ямке. Центры этих рецептивных полей расположены на расстоянии одного диаметра центральной зоны [29]. Проводя аналогию с детекторным полем, можно определить, что сдвиг поля определяется размерами центральной области детектора и для квадратного детектора равен по вертикали и по горизонтали $\{0; \pm 2m\}$ пикселей.

На рис. 7 показано взаимодействие слоя обработки с входным изображением в процессе выборки данных чувствительными областями по принципу дрейфа детекторного поля.

Дрейф детекторного поля, при котором центральные области соприкасаются, но не перекрываются, обеспечивает получение отсчетов, необходимых для сохранения целостности границ объектов в выходном представлении, а сама размерность массива данных на выходе слоя будет $\left[\frac{2M+1}{m}\right] \times \left[\frac{2N+1}{m}\right]$. Чтобы получить выходной массив с такими пространственными размерами, необходимо использовать «дополнение» (padding). Дополнение заключается в добавлении соответствующего количества строк и столбцов с каждой стороны входного слоя, чтобы можно было в процессе дрейфа поместить центр чувствительной области в соответствующую область входного изображения. При этом целесообразно добавление нулевыми элементами или использование функций «повторения крайних известных элементов» (replicate) [4].

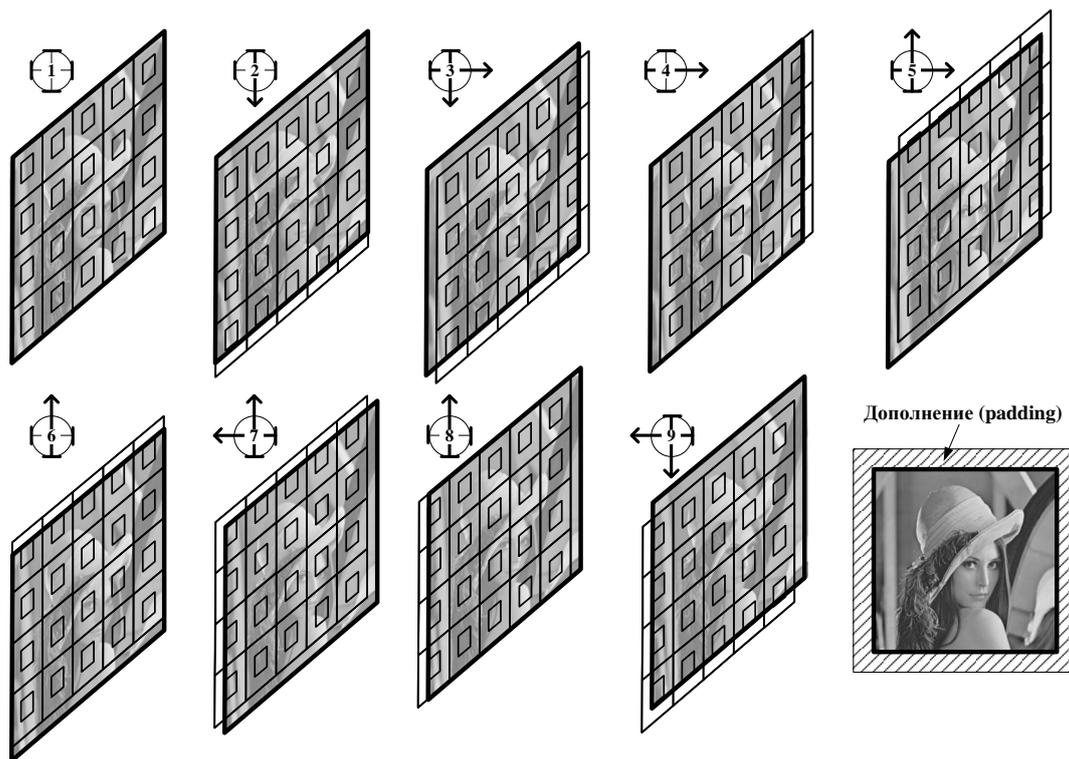


Рис. 7. Дрейф детекторного поля

Отсутствие пропуска границ яркости за счет дрейфа поля обеспечивается формированием девяти отсчетов для каждой чувствительной области, при этом отсчеты, через которые не проходит граница освещенности, будут нулевыми. На рис. 8 выноской показаны отсчеты детектора, через который прохо-

дит граница освещенности. Детекторное поле выделит границу освещенности, причем большей яркости будут соответствовать положительные отсчеты, а меньшей – отрицательные. При отсутствии смещения слоя эта граница не выделяется, т.к. все отсчеты будут нулевыми.

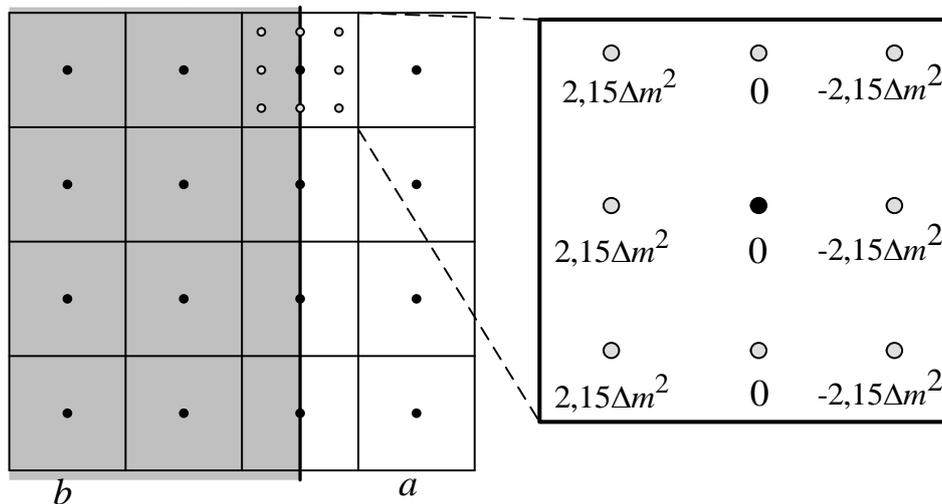


Рис. 8. Обнаружение границы в процессе дрейфа поля

На рис. 9 приведены примеры выделения границ объектов стандартного тестового изображения «Lenna» размерностью 512 ×

512 известными методами контурного анализа [30], а также результаты работы детекторных полей.

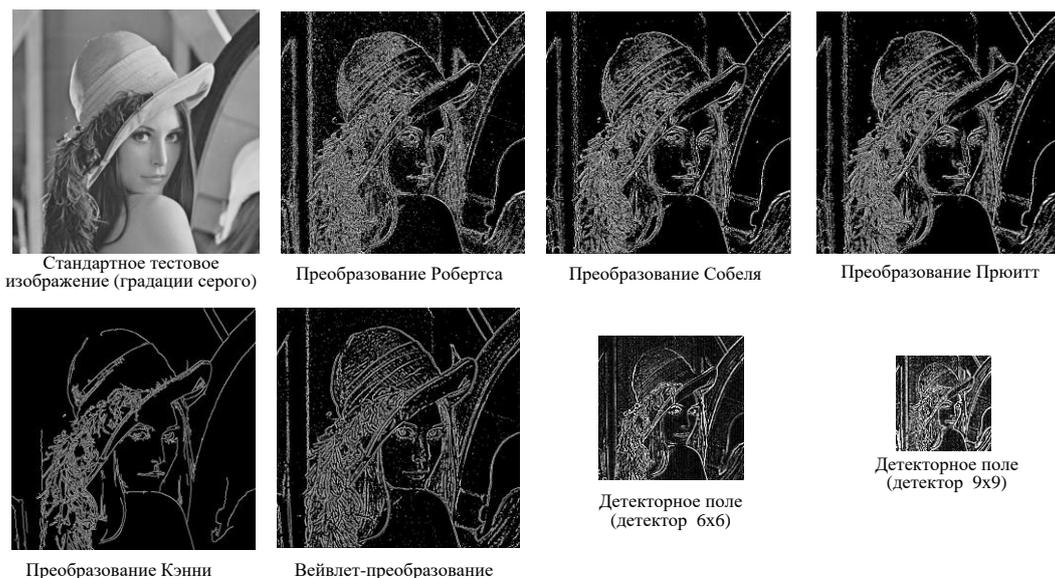


Рис. 9. Выделение контура различными методами

Таким образом, слой предварительной обработки можно интерпретировать как функцию, которая принимает двумерный тензор, содержащий изображение (или кадр видеопоследовательности) и возвращает другой двумерный тензор – новое представление исходного тензора, содержащего все значимые элементы входного изображения (контур, границы освещенности, формы объектов, их положение и т.д.) при меньшем объеме данных. При этом поэлементные операции, которые применяются к каждому элементу в тензоре по отдельности, идентичны, т.е. без труда поддаются массовому распараллеливанию (векторизации). Сама процедура наложения детекторного поля на изображение и его дрейф (установка связей между входным слоем и слоем предварительной обработки) осуществ-

ляется выборкой конкретных элементов в пределах структурированных чувствительных областей, т.е. получением среза тензора.

Все операции слоя легко реализуются комплектами низкоуровневых, параллельных и эффективных процедур для вычислений с тензорами, что обеспечивает их мгновенное выполнение.

Для решения задачи множественной классификации в ходе обработки изображений или видеопоследовательностей с помощью нейронных сетей может быть использована архитектура, обеспечивающая снижение вычислительной нагрузки систем мобильных объектов, которая схематично представлена на рис. 10. В обозначениях используются названия слоев фреймворка глубокого обучения Keras языка Python [4].

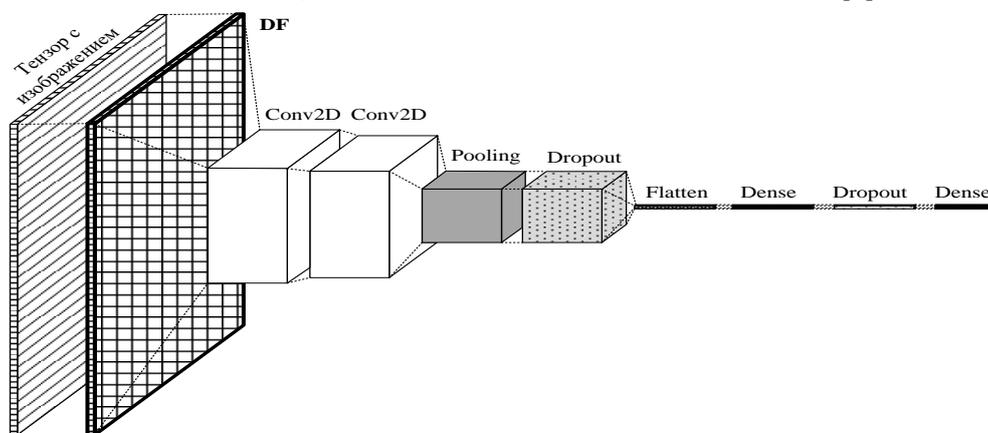


Рис. 10. Архитектура нейронной сети с детекторным полем

Кратко архитектура поясняется следующим образом. Входной слой принимает стандартный вид, который определяется исходя из действующих двух соглашений в от-

ношении форм тензоров с изображениями: «канал следует последним» и «канал следует первым». Например, используется тензор формата: образцы, высота, ширина, цвет.

Слой «DF» – это слой, реализующий функции детекторного поля, где содержится информация о размерности изображения и величине детектора, в частности о его центральной области. Именно на данном слое устраняется избыточность и в значительной степени уменьшается объем передаваемых на следующий этап данных без потери информации о присутствии объектов и их элементов. Слой детекторного поля, взаимодействуя со слоем изображения методом выборки, фиксирует девять позиций и извлекает массив данных с формой, соответствующей входному изображению. Каждый такой массив затем преобразуется путем умножения элементов тензора изображения на матрицу весов детекторного поля, реализующих двухзонную структуру. Реакции всех чувствительных областей сводятся в трехмерный массив с формой (высота, ширина, выходная глубина). При этом изменяется масштаб, но сохраняется каждое пространственное местоположение в выходном массиве относительно входного (например, левый верхний угол выхода содержит информацию о левом верхнем угле входа).

Слой Conv2D изучают локальные шаблоны в небольших двумерных окнах во входных данных, которые являются инвариантными в отношении переноса

Фактор, который может влиять на размер выходного массива признаков, – это шаг свертки. По умолчанию предполагается, что окно свертки последовательно перемещается в смежные ячейки входного слоя. В общем случае расстояние между двумя соседними окнами является настраиваемым параметром. Но в отличие от слоя детекторного поля, где исключается пропуск границ объектов, увеличение шага свертки на данном этапе однозначно приводит к потере информации.

Операция выбора «максимального значения из соседних» реализуется в слое Max-pooling. Выбор максимального значения из соседних обычно производится с окном 2×2 .

Слой Conv2D и Max-pooling обычно следуют каскадом («связкой слоев»). Первый сверточный слой будет изучать небольшие локальные шаблоны, такие как края, пере-

данные с выхода детекторного поля. Далее, второй и последующие – более крупные шаблоны, состоящие из признаков предыдущих слоев. Измерения ширины и высоты сжимаются с ростом глубины сети. Последовательность таких связей реализует изучение все более сложных и абстрактных визуальных представлений.

Слой прореживания (Dropout) – один из наиболее эффективных и распространенных приемов борьбы с переобучением для нейронных сетей, заключающийся в удалении (присваивании нуля) случайно выбираемым признакам на этапе обучения.

Сверточные сети дополняются слоем Flatten или слоем «глобального выбора», превращающими массив пространственных признаков в векторы, за которыми следуют полносвязные слои Dense, реализующие в данном случае классификацию.

ВЫВОДЫ

Таким образом, используя бионический подход, можно реализовать одно из достоинств зрительной системы, позволяющее существенно уменьшать объем данных, передаваемых на следующий уровень обработки. При этом выигрыш в количестве сокращенных вычислений определяется порядками, учитывая колоссальное множество операций в процессе работы нейронной сети и обрабатываемых образцов на этапе ее обучения. Снижение вычислительной нагрузки влечет за собой уменьшение массогабаритных размеров и потребления энергии, что является принципиальным для мобильных объектов.

Двухзонная основа детекторного поля, реализованного в качестве слоя нейронной сети, обеспечивает выделение границ объектов на изображении. При этом наиболее важные структурные свойства изображения сохраняются, но существенно уменьшается количество обрабатываемых данных из-за устранения менее значимых элементов изображения. Операции, реализующие функции детекторных полей, элементарны и идентичны, без труда поддаются массовому распараллеливанию (векторизации), что обеспечивает их быстрое выполнение.

ЛИТЕРАТУРА

1. GPTChatbot: AdvancedAIChat. 2023. URL: Chat-GPT.org (дата обращения: 27.04.2023).
2. Тихонов, К. Дата-центры Google и Facebook потребляют больше энергии, чем целые города / К. Тихонов. – Текст: электронный // Компьютерра 1997-2023: электрон, журн. 2012. URL: <https://www.computerra.ru/216035/data-tsentryi-google-facebook-i-apple-potreblyayut-bolshe-e/> (дата обращения: 27.04.2023).

3. Визильтер, Ю.В. Проблемы технического зрения в современных авиационных системах / Ю.В. Визильтер, С.Ю. Желтов // Техническое зрение в системах управления мобильными объектами-2010: Труды научно-технической конференции-семинара. 16–18 марта 2010 г., г. Таруса. М.: Вып. 4 / Под ред. Р. Р. Назирова. Москва: КДУ, 2011. – С. 11– 44. – Текст: непосредственный.
4. Шолле, Ф. Глубокое обучение на Python 2-е межд. изд. / Ф. Шолле.– Санкт -Петербург: Питер, 2022.– 400 с. – Текст: непосредственный.
5. Грегори, Р. Разумный глаз: Как мы узнаем то, что нам не дано в ощущениях/ Ричард Лэнгтон Грегори. Москва: Едиториал УРСС, 2003. – 240 с. – Текст: непосредственный.
6. Эргономика зрительной деятельности человека / В.В. Волков, А.В. Луизов, Б.В. Овчинников, Н.П. Травникова. – Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1989. – 112 с. – Текст: непосредственный.
7. Блум, Ф. Мозг, разум и поведение: пер. с англ./ Ф. Блум, А. Лейзерсон, А. Ховстедтер. – Москва: Мир, 1988. – 248с. – Текст: непосредственный.
8. Смит, К. Биология сенсорных систем / К. Смит.– Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 583 с. – Текст: непосредственный.
9. Гершуни, Г.В. Физиология сенсорных систем. Ч. 1. Физиология зрения / Под ред. Г.В. Гершуни. Л.: Наука, 1971. – 702 с. – Текст: непосредственный.
10. Ярбус, А.Л. Роль движения глаз в процессе зрения / А.Л. Ярбус. Москва: Наука, 1965. – 173 с. – Текст: непосредственный.
11. Ditchburn, R. W. Eye-Movements and Visual Perception / R.W. Ditchburn. – New York: Clarendon (Oxford University Press), 1973.–422p.–Текст: непосредственный.
12. Miniature eye movement / R.M. Steinman, G.M. Haddad, A.A. Skavenski, D. Wyman. – Текст: непосредственный // Science – 1973.– Vol. 181.– Pp. 810–819.
13. Hilch, J. The spatial resolution capacity of human fovea / J. Hilch, R. Hylton. – Текст: непосредственный // Vision Res. 24.– 1984. – Pp. 347–356.
14. Хьюбел, Д. Глаз, мозг, зрение / Д. Хьюбел. – Москва: Мир, 2003. –240с. – Текст: непосредственный.
15. Хьюбел, Д. Мозг и зрительное восприятие / Д. Хьюбел, Т. Визел. Москва: Институт компьютерных исследований, 2012. – 840 с.– Текст: непосредственный.
16. Шульговский, В.В. Основы нейрофизиологии / В.В. Шульговский.– Москва: Аспект Пресс, 2000. – 277 с.– Текст: непосредственный.
17. Блинов, Н.Н. Глаз и изображение / Н.Н. Блинов. – М.: Медицина, 2004. – 320с. – Текст: непосредственный.
18. Стокхэм, Т. Дж., мл. Обработка изображений в контексте моделей зрения / Т. Дж. Стокхэм, мл. – Текст: непосредственный // ТИИЭР.– 1972. – Т. 60. – № 7.– С. 93– 108.
19. Lindeberg, T. Scale in variant feature transform / T. Lindeberg. – Текст: непосредственный // Scholarpedia. – 2012. – Т. 7.– Вып. 5. – С. 10491.
20. Oyallon, E. Analysis of the SURF Method / E. Oyallon, J. Rabin. – Текст: непосредственный // Image Processing On Line. – 2015– Vol. 5. – P. 176–218.
21. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс. Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2-е изд. Москва: Вильямс, 2006. – 1104 с. – Текст: непосредственный.
22. Theory of Object Recognition: Computations and Circuits in the Feedforward Path of the Ventral Stream in Primate Visual Cortex / T. Serre, M. Kouh, C. Cadieu, U. Knoblich, [et al.]. – Текст: непосредственный // Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory Technical Report, December 19, 2005. MIT-CSAIL-TR-2005-082.
23. Fukushima, K. Neocognitron: A neural network model for a mechanism of visual pattern recognition / K. Fukushima. – Текст: непосредственный// Neurocomputing. – 2003. – No 51. P. 161 – 180.
24. Y. LeCun and Y. Bengio: Convolutional Networks for Images, Speech, and Time-Series, in Arbib, M. A. (Eds), The Handbook of Brain Theory and Neural Networks, MIT Press, 1995.– 14 с. – Текст: непосредственный
25. Чангизи, М. Революция в зрении: что, как и почему мы видим на самом деле/ Марк Чангизи; пер. с англ. А. Гопко. Москва: Издательство АСТ: CORPUS, 2015. – 304 с. – Текст: непосредственный
26. Гельмгольц, Г. О зрении человека. Новейшие успехи теории зрения / Г. Гельмгольц.– Москва: Либроком, 2011. – 192 с. – Текст: непосредственный.

27. Пономарев, А.В. Двумерная дискретная фильтрация выходных сигналов детекторных полей / А.В. Пономарев, А.В. Богословский, И.В. Жигулина. – Текст: непосредственный // Радиотехника. – 2018. – № 7. – С. 137–145. DOI 10.18127/j00338486-201807-24.
28. Редозубов, А. Логика сознания / А. Редозубов. – Текст электронный.–2011. URL: <http://www.aboutbrain.ru> (дата обращения: 27.04.2023).
29. Packer, O. Receptive field structure of H1 horizontal cells in macaque monkey retina / O.Packer, D. Dacey // *Journal of Vision*. – 2002. – 2(4). – P. 279–292.
30. Земляной, И.С. Исследование методов выделения и применения опорных контуров с целью распознавания лиц / И.С. Земляной. – Текст: непосредственный // Материалы 58-ой научной конференции с международным участием. Московский физико-технический институт, 23–28 ноября 2015 года. Москва: МФТИ, 2015.

REFERENCES

1. GPT Chatbot: Advanced AI Chat. 2023. URL: [Chat-GPT.org](https://chat-gpt.org) (accessed 27.04.2023).
2. Tikhonov, K. Google and Facebook data centers consume more energy than entire cities / K. Tikhonov // *Computerra 1997-2023: electron, journal*. 2012. URL: <https://www.computerra.ru/216035/data-tsentryi-google-facebook-i-apple-potrebyayut-bolshe-e/> (date of access: 04/27/2023).
3. Vizilter, Yu.V. Problems of technical vision in modern aviation systems / Yu.V. Vizilter, S.Yu. Zheltov // *Technical vision in mobile object control systems-2010: Proceedings of the scientific and technical conference-seminar*. March 16–18, 2010, Tarusa. M.: Issue. 4 / Ed. R. R. Nazirova. M.: KDU, 2011.–Pp. 11– 44. (in Russian)
4. Chollet, F. Deep Learning with Python 2nd Int. ed. / F. Chollet. - St. Petersburg: Peter, 2022. - 400 p. (in Russian)
5. Gregory, R. Reasonable eye: How do we know what we are not given in the senses / Richard Langton Gregory. Moscow: Editorial URSS, 2003. – 240 p. (in Russian)
6. Ergonomics of human visual activity / V.V. Volkov, A.V. Luizov, B.V. Ovchinnikov, N.P. Travnikov. - L.: Mechanical engineering. Leningrad. Department, 1989. - 112 p. (in Russian)
7. Bloom, F. Brain, mind and behavior: Per. from English / F. Bloom, A. Leizeron, A. Hovstedter. - Moscow: Mir, 1988. – 248 p. (in Russian)
8. Smith, K. Biology of sensory systems / K. Smith. - Moscow: BINOM. Knowledge Laboratory, 2013. - 583 p. (in Russian)
9. Gershuni, G.V. Physiology of sensory systems. Part 1. Physiology of vision / Ed. G.V. Gershuni. L.: Nauka, 1971. - 702 p. (in Russian)
10. Yarbus, A.L. The role of eye movement in the process of vision / A.L. Yarbus. Moscow: Nauka, 1965. - 173 p. (in Russian)
11. Ditchburn, R.W. Eye-Movements and Visual Perception / R.W. Ditchburn. – New York: Clarendon (Oxford University Press), 1973.– 422p.
12. Miniature eye movement / R.M. Steinman, G.M. Haddad, A.A. Skavenski, D. Wyman // *Science* - 1973.– Vol. 181.– P. 810–819.
13. Hilch, J. The spatial resolution capacity of human fovea / J. Hilch, R. Hylton // *Vision Res*. 24.– 1984. – Pp. 347–356.
14. Hubel, D. Eye, brain, vision / D. Hubel. – Moscow: Mir, 2003.- 240p. (in Russian)
15. Hubel, D. Brain and visual perception / D. Hubel, T. Wiesel. Moscow: Institute for Computer Research, 2012. – 840 p. (in Russian)
16. Shulgovsky, V.V. Fundamentals of neurophysiology / V.V. Shulgovsky. - Moscow: Aspect Press, 2000. – 277 p. (in Russian)
17. Blinov, N.N. Eye and image / N.N. Blinov. – Moscow: Medicine, 2004. – 320p. (in Russian)
18. Stockham, T.J., Jr. Image processing in the context of vision models / T. J. Stockham, Jr // *TIHER*. - 1972. - T. 60. – No 7. – Pp. 93–108.
19. Lindeberg, T. Scale invariant feature transform / T. Lindeberg // *Scholarpedia*. – 2012. – Vol. 7. – Issue. 5. – P. 10491.
20. Oyallon, E. Analysis of the SURF Method / E. Oyallon, J. Rabin // *Image Processing On Line*. – 2015 – Vol. 5.- P. 176–218.
21. Khaykin, S. Neural networks: a complete course. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. 2nd ed. Moscow: Williams, 2006. – 1104 p.(in Russian)

22. Theory of Object Recognition: Computations and Circuits in the Feedforward Path of the Ventral Stream in Primate Visual Cortex / T. Serre, M. Kouh, C. Cadieu, U. Knoblich, [et al.] // Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory Technical Report, December 19, 2005. MIT-CSAIL-TR-2005-082.
23. Fukushima, K. Neocognitron: A neural network model for a mechanism of visual pattern recognition / K. Fukushima // Neurocomputing. – 2003. – No 51. – P. 161–180.
24. Y. LeCun and Y. Bengio: Convolutional Networks for Images, Speech, and Time-Series, in Arbib, M. A. (Eds), The Handbook of Brain Theory and Neural Networks, MIT Press, 1995.– 14 p.
25. Changizi, M. Revolution in vision: what, how and why we actually see / Mark Changizi; per. from English. A. Gopko. Moscow: Publishing House AST: CORPUS, 2015. – 304 p. (in Russian)
26. Helmholtz, G. About human vision. The latest advances in the theory of vision / G. Helmholtz. – Moscow: Librokom, 2011. – 192 p. (in Russian)
27. Ponomarev, A.V. Two-dimensional discrete filtering of output signals of detector fields / A.V. Ponomarev, A.V. Bogoslovsky, I.V. Zhigulina // Radio engineering. – 2018. – No 7. – P. 137–145. DOI 10.18127/j00338486-201807-24. (in Russian)
28. Redozubov, A. The logic of consciousness / A. Redozubov. – 2011. URL: <http://www.aboutbrain.ru> (date of access: 27.04.2023).
29. Packer, O. Receptive field structure of H1 horizontal cells in macaque monkey retina / O. Packer, D. Dacey // Journal of Vision. – 2002. – 2(4). – P. 279 – 292.
30. Zemlyanoy, I.S. Investigation of methods of selection and application of support contours for the purpose of face recognition / I.S. Earthy // Proceedings of the 58th scientific conference with international participation. Moscow Institute of Physics and Technology, November 23–28, 2015. Moscow: MIPT, 2015. (in Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, ORCID, Email)
Пономарев А.В.	д.т.н., доцент, cycloida@mail.ru
Богословский А. В.	д.т.н., профессор,  0000-0002-2008-717X , p-digim@mail.ru
Жигулина И. В.	к.т.н., доцент, ira_zhigulina@mail.ru
Пономарев Н.А.	cycloida@mail.ru

AUTHORS INFORMATION

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, ORCID, Email)
Ponomarev A.V..	DSc. Assistant professor, cycloida@mail.ru
Bogoslovsky A.V.	DSc, Professor,  0000-0002-2008-717X , p-digim@mail.ru
Zhigulina I.V.	PhD, Assistant professor, ira_zhigulina@mail.ru
Ponomarev N.A.	cycloida@mail.ru

АНИЗОТРОПНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ БЛИЗКОРАСПОЛОЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Пантюхин М.А.	1		
Богословский А.В.	1	 0000-0002-2008-717X	pull-request@mail.ru
Жигулина И. В.	1		p-digim@mail.ru
Легостаева Е.С.	1		ira_zhigulina@mail.ru legelen36@gmail.com

¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина», ул. Старых Большевиков, 54а, г. Воронеж, 394064, Россия, кафедра радиоэлектроники, научно-исследовательского центра информационный и образовательных технологий

Аннотация: работа посвящена решению одной из задач предварительной обработки изображений – задачи выделения близкорасположенных или перекрывающихся объектов. Для выделения объектов с одновременным подавлением фона использованы методы двумерной дискретной фильтрации. Рассматривается подход, позволяющий избежать появления недостоверных отсчетов выходного изображения, возникающих при использовании стандартных методов компенсации краевых эффектов. Тем самым исключается некорректное формирование выходного изображения. Для компенсации краевых эффектов, возникающих при обработке областей близко расположенных объектов и оказывающих взаимное отрицательное влияние при отдельном выделении таких объектов, исследована возможность переконфигурирования фильтров. Предложен метод обработки изображений близкорасположенных объектов путем анизотропной фильтрации. Введено понятие формирующего элемента дискретного двумерного фильтра. Разработан механизм реконфигурации анизотропного фильтра, который позволяет обрабатывать изображения с использованием только достоверных отсчетов. Переконфигурирование фильтра происходит путем переиндексации его отсчетов и переопределения параметров самой апертуры, а формирующий элемент, оставаясь по-прежнему с нулевыми индексами, просто меняет свою позицию в импульсной характеристике фильтра. Приведен пример реконфигурации дискретного двумерного фильтра. Показано, как изменение позиции формирующего элемента фильтра влияет на изменение позиции выходного отсчета обработанного изображения. В отличие от изотропной фильтрации, при которой краевые эффекты возникают по всей границе изображения, обработка изображения фильтром рассматриваемой конфигурации исключает появление краевых эффектов на некоторых участках изображения. Определены различия в наборах отсчетов коэффициента автокорреляции эталонного изображения для синтеза фильтров одинаковой апертуры, но разной конфигурации. Предложен критерий оценивания результатов фильтрации, и проведено сравнение показателей эффективности обработки фильтрами различных конфигураций на примерах обработки фрагментов реальных изображений.

Ключевые слова: предварительная обработки изображений, конфигурация анизотропного дискретного фильтра.

ANISOTROPIC FILTERING OF NEARBY OBJECT IN IMAGES

Pantukhin M.A.	1		
Bogoslovsky A.V.	1	 0000-0002-2008-717X	pull-request@mail.ru
Zhigulina I.V.	1		p-digim@mail.ru
Legostaeva E.S.	1		ira_zhigulina@mail.ru legelen36@gmail.com

¹Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, st. Starykh Bolshevikov, 54a, Voronezh, 394064, Russia, Department of Radio Electronics, Research Center for Information and Educational Technologies

Abstract: the work offers a solution to one of the problems of image preprocessing – the problem of selecting nearby or overlapping objects. For selecting objects with simultaneous background suppression, 2D discrete filtering methods are used. A method to avoid the appearance of unreliable readings of the output image is proposed. This eliminates the incorrect formation of the output image that occurs with usage of standard methods. The edge effects arise when processing areas of closely spaced objects and have a mutually negative effect when such objects are selected separately. Hence, to compensate for the edge effects, the possibility of reconfiguring filters is investigated. A method for processing images of nearby objects by anisotropic filtering is proposed. The concept of a forming element of a discrete two-dimensional filter is introduced. An anisotropic filter reconfiguration mechanism is developed, which allows processing images using only reliable readings. The filter is reconfigured by re-indexing its readings and redefining the parameters of the aperture itself. The forming element, remaining with zero indices as before, simply changes its position in the filter's impulse response. An example of reconfiguration of a discrete two-dimensional filter is given. It is shown how a change in the position of the filter forming element affects the change in the posi-

tion of the output sample of the processed image. In isotropic filtering, edge effects occur over the entire image boundary. In contrast, image processing with a filter of the considered configuration eliminates the appearance of edge effects in some areas of the image. The differences in the sets of samples of the autocorrelation coefficient of the reference image for the synthesis of filters of the same aperture but different configurations are determined. A criterion for evaluating the results of filtering is proposed. A comparison of the efficiency indicators of processing by filters of various configurations is carried out. In the comparison, examples of processing fragments of real images are used.

Key words: image preprocessing, anisotropic discrete filter configuration, image line video signal.

ВВЕДЕНИЕ

Предварительная обработка изображений заключается, как правило, в компенсации шумов и искажений на цифровых изображениях, т.е. на данном этапе осуществляется подготовка изображений для последующих процедур автоматического или автоматизированного анализа [1]. Одной из задач предобработки является выделение близкорасположенных объектов либо объектов с частично перекрытыми областями, которые встречаются, например, в задачах морфологического анализа биомедицинских и промышленных изображений, где необходим количественный анализ отдельных объектов, как по размеру, так и по форме [2-5]. Если необходимо одновременно выделить множество близкорасположенных или перекрывающихся объектов, то даже с априори известными фигурами таких объектов, их сегментация является непростой, а при недостаточной информации о формах объектов процесс сегментации существенно усложняется [5,6].

Для предварительной обработки изображений могут применяться методы двумерной дискретной фильтрации, среди которых особое место отводится методам выделения объектов с одновременным подавлением фона [7]. Дискретная двумерная фильтрация не позволяет полностью подавить составляющие сигнала изображения, не соответствующие областям интереса, поэтому после нее выполняются нелинейную пороговую обработку [1].

При дискретной двумерной фильтрации каждый отсчет выходного изображения формируется как взвешенная сумма множества отсчетов входного изображения (ВИ) [7]:

$$f_{m,n}^{\text{ВЫХ}} = \sum_{k=-a}^b \sum_{l=-c}^d f_{m+k,n+l} h_{k,l}, \quad (1)$$

где $f_{m,n}$ - отсчет видеосигнала изображения в точке с пространственными координатами (m, n) ; $-M \leq m \leq M$, $-N \leq n \leq N$; h_{kl} - отсчеты импульсной характеристики (ИХ) дискретного двумерного фильтра (ДДФ); a, b, c, d - неотрицательные числа,

определяющие апертуру фильтра $A_h = (a + b + 1)(c + d + 1)$.

Отсчет ИХ фильтра $h_{0,0}$ - это центральный элемент ИХ. Он также является «формирующим» элементом, поскольку результат суммирования по (1) записывается в позицию с такими же индексами, как и у входного отсчета, весовым коэффициентом которого является $h_{0,0}$. На рис. 1 показана схема формирования выходного отсчета, где все направления равнозначны (т.н. изотропная фильтрация [1, 8]).

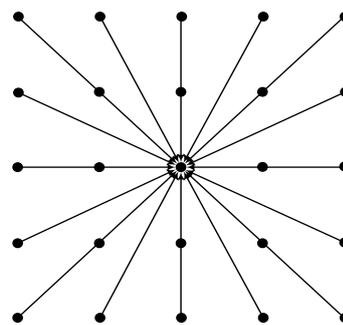


Рис. 1. Схема формирования отсчета выходного видеосигнала при изотропной фильтрации

При дискретной двумерной фильтрации неизбежно возникают краевые эффекты, причем не только на границах конечного по пространственным координатам изображения, но и на всех участках перепада яркости по всему полю изображения. Как правило, для компенсации краевых эффектов на границах входное изображение дополняют нулевыми элементами до требуемого размера [1,7,8], что приводит к появлению недостоверных отсчетов и некорректному формированию выходного изображения. Неразрешенной также остается проблема компенсации краевых эффектов, возникающих при обработке областей близко расположенных объектов и оказывающих взаимное отрицательное влияние при отдельном выделении таких объектов. В этом случае изотропная конфигурация ДДФ не обеспечивает должного качества обработки, поэтому одним из возможных путей компенсации краевых эффектов является переконфигурирование фильтров.

Цель статьи- определить механизмы реконfigurирования двумерных дискретных фильтров для исключения появления недо-стоверных отсчетов выходных изображений и подбора требуемой конфигурации фильтра для разделения изображений близкорасполо-женных объектов.

АНИЗОТРОПНАЯ ДИСКРЕТНАЯ ДВУМЕРНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ

В отличие от изотропной обработки, при анизотропной фильтрации не все пространственные направления считаются равнозначными, поэтому необходим некий механизм реконfigurации фильтров в зависимости от расположения «формирующего» элемента.

Реализация анизотропной фильтрации предполагает, что в общем случае в произвольной точке с пространственными координатами (m_0, n_0) выходной видеосигнал формируется не по (1), а по следующему соотношению [8]:

$$f_{m+m_0, n+n_0}^{\text{ВЫХ}} = \sum_{k=-a}^b \sum_{l=-c}^d f_{m+k, n+l} h_{k-m_0, l-n_0}. \quad (2)$$

$$f_{-4, 3}^{\text{ВЫХ}} = \sum_{k=0}^2 \sum_{\tilde{l}=-2}^0 f_{-4+k, 3+\tilde{l}} h_{k, \tilde{l}} = f_{-4, 1} h_{0, -2} + f_{-4, 2} h_{0, -1} +$$

$$+ f_{-4, 3} h_{0, 0} + f_{-3, 1} h_{1, -2} + f_{-3, 2} h_{1, -1} + f_{-3, 3} h_{1, 0} + f_{-2, 1} h_{2, -2} + f_{-2, 2} h_{2, -1} + f_{-2, 3} h_{2, 0}$$

При изотропной (стандартной) дискретной двумерной фильтрации краевые эффекты возникают по всей границе изображения. Обработка изображения фильтром рассматриваемой конфигурации исключает по-

Таким образом, для задания конфигурации ДДФ необходимы два показателя $\{A_h, F\}$, где A_h - апертура фильтра, $F = (m_0, n_0)$ - позиция «формирующего» элемента.

В частности, если позиция «формирующего» элемента $F = (-a, d)$, то получаем соотношение:

$$f_{m-a, n+d}^{\text{ВЫХ}} = \sum_{k=-a}^b \sum_{l=-c}^d f_{m+k, n+l} h_{k+a, l-d}. \quad (3)$$

На рис. 2 проиллюстрировано изменение конфигурации ДДФ по (2) на примере переноса «формирующего» отсчета (3×3) - фильтра в позицию с индексами $(-1, 1)$. В этом случае после переконfigurирования фильтра с первоначальными параметрами $a = b = c = d = 1$ происходит изменение индексации его отсчетов и переопределение параметров самой апертуры: $a = d = 0, c = d = 2$. Формирующий элемент, оставаясь по-прежнему с индексами $(0, 0)$, просто меняет свою позицию в ИХ фильтра.

Покажем, как при этом находится значение одного из выходных отсчетов видеосигнала, например:

явления краевых эффектов по левому и верхнему краю всего поля изображения (см. рис.2, в).

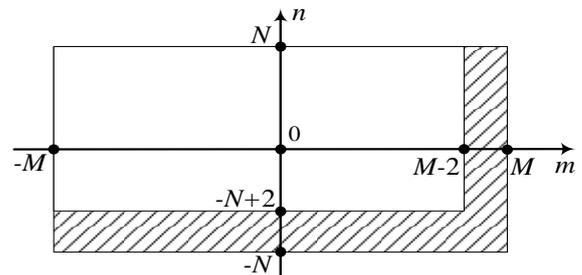
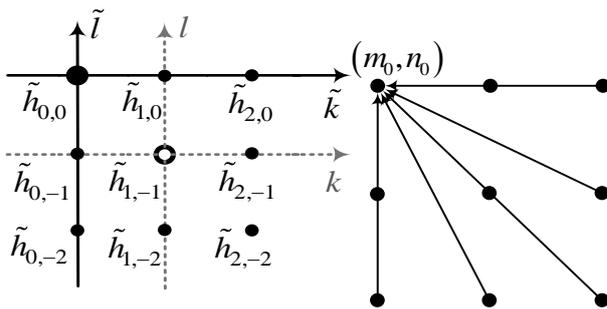


Рис. 2. Пример реконfigurации ДДФ:

а) изменение позиции «формирующего» элемента фильтра; б) изменение позиции выходного отсчета обработанного изображения; в) область краевого эффекта при обработке фильтром заданной конфигурации

После выбора конфигурации ДДФ путем решения системы линейных алгебраических уравнений находят отсчеты ИХ [7,9]:

$$\sum_{v=-a}^b \sum_{w=-c}^d s_{i-v, j-w} h_{v, w} = s_{i, j}^0, \quad (4)$$

где $h_{v, \omega}$ - отсчеты ИХ ДДФ, $s_{i, j}$ и $s_{i, j}^0$ - отсчеты коэффициентов автокорреляции входного и эталонного изображений соответственно. В качестве примера рассмотрим системы для нахождения отсчетов ИХ (3×3) -фильтров: исходного (изотропного) и реконfigurиро-

ванного согласно рис. 2. Жирным шрифтом в системах отмечены те отсчеты ИХ фильтра и те отсчеты коэффициента автокорреляции эталонного изображения (свободные слагаемые), которыми различаются обе системы; набор остальных компонент систем идентичен.

$$\left\{ \begin{array}{l} s_{0,0}h_{0,0} + s_{0,1}h_{0,-1} + s_{1,1}h_{-1,-1} + s_{1,0}h_{-1,0} + s_{1,-1}h_{-1,1} + s_{0,-1}h_{0,1} + s_{-1,-1}h_{1,1} + s_{-1,0}h_{1,0} + s_{-1,1}h_{1,-1} = s_{0,0}^{\circ}, \\ s_{0,-1}h_{0,0} + s_{0,0}h_{0,-1} + s_{1,0}h_{-1,-1} + s_{1,-1}h_{-1,0} + s_{1,-2}h_{-1,1} + s_{0,-2}h_{0,1} + s_{-1,-2}h_{1,1} + s_{-1,-1}h_{1,0} + s_{-1,0}h_{1,-1} = s_{0,-1}^{\circ}, \\ s_{-1,-1}h_{0,0} + s_{-1,0}h_{0,-1} + s_{0,0}h_{-1,-1} + s_{0,-1}h_{-1,0} + s_{0,-2}h_{-1,1} + s_{-1,-2}h_{0,1} + s_{-2,-2}h_{1,1} + s_{-2,-1}h_{1,0} + s_{-2,0}h_{1,-1} = s_{-1,-1}^{\circ}, \\ s_{-1,0}h_{0,0} + s_{-1,1}h_{0,-1} + s_{0,1}h_{-1,-1} + s_{0,0}h_{-1,0} + s_{0,-1}h_{-1,1} + s_{-1,-1}h_{0,1} + s_{-2,-1}h_{1,1} + s_{-2,0}h_{1,0} + s_{-2,1}h_{1,-1} = s_{-1,0}^{\circ}, \\ s_{-1,1}h_{0,0} + s_{-1,2}h_{0,-1} + s_{0,2}h_{-1,-1} + s_{0,1}h_{-1,0} + s_{0,0}h_{-1,1} + s_{-1,0}h_{0,1} + s_{-2,0}h_{1,1} + s_{-2,1}h_{1,0} + s_{-2,2}h_{1,-1} = s_{-1,1}^{\circ}, \\ s_{0,1}h_{0,0} + s_{0,2}h_{0,-1} + s_{1,2}h_{-1,-1} + s_{1,1}h_{-1,0} + s_{1,0}h_{-1,1} + s_{0,0}h_{0,1} + s_{-1,0}h_{1,1} + s_{-1,1}h_{1,0} + s_{-1,2}h_{1,-1} = s_{0,1}^{\circ}, \\ s_{1,1}h_{0,0} + s_{1,2}h_{0,-1} + s_{2,2}h_{-1,-1} + s_{2,1}h_{-1,0} + s_{2,0}h_{-1,1} + s_{1,0}h_{0,1} + s_{0,0}h_{1,1} + s_{0,1}h_{1,0} + s_{0,2}h_{1,-1} = s_{1,1}^{\circ}, \\ s_{1,0}h_{0,0} + s_{1,1}h_{0,-1} + s_{2,1}h_{-1,-1} + s_{2,0}h_{-1,0} + s_{2,-1}h_{-1,1} + s_{1,-1}h_{0,1} + s_{0,-1}h_{1,1} + s_{0,0}h_{1,0} + s_{0,1}h_{1,-1} = s_{1,0}^{\circ}, \\ s_{1,-1}h_{0,0} + s_{1,0}h_{0,-1} + s_{2,0}h_{-1,-1} + s_{2,-1}h_{-1,0} + s_{2,-2}h_{-1,1} + s_{1,-2}h_{0,1} + s_{0,-2}h_{1,1} + s_{0,-1}h_{1,0} + s_{0,0}h_{1,-1} = s_{1,-1}^{\circ}. \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} s_{0,0}h_{0,0} + s_{0,1}h_{0,-1} + s_{-1,0}h_{1,0} + s_{-1,1}h_{1,-1} + s_{-1,2}h_{-1,-2} + s_{0,2}h_{0,-2} + s_{-2,0}h_{2,0} + s_{-2,1}h_{2,-1} + s_{-2,2}h_{2,-2} = s_{0,0}^{\circ}, \\ s_{0,-1}h_{0,0} + s_{0,0}h_{0,-1} + s_{-1,-1}h_{1,0} + s_{-1,0}h_{1,-1} + s_{-1,1}h_{-1,-2} + s_{0,1}h_{0,-2} + s_{-2,-1}h_{2,0} + s_{-2,0}h_{2,-1} + s_{-2,1}h_{2,-2} = s_{0,-1}^{\circ}, \\ s_{1,1}h_{0,0} + s_{1,1}h_{0,-1} + s_{0,0}h_{1,0} + s_{0,1}h_{1,-1} + s_{0,2}h_{-1,-2} + s_{1,2}h_{0,-2} + s_{-1,0}h_{2,0} + s_{-1,1}h_{2,-1} + s_{-1,2}h_{2,-2} = s_{1,0}^{\circ}, \\ s_{1,-1}h_{0,0} + s_{1,0}h_{0,-1} + s_{0,-1}h_{1,0} + s_{0,0}h_{1,-1} + s_{0,1}h_{-1,-2} + s_{1,1}h_{0,-2} + s_{-1,-1}h_{2,0} + s_{-1,-1}h_{2,-1} + s_{2,-1}h_{2,-2} = s_{1,-1}^{\circ}, \\ s_{1,-2}h_{0,0} + s_{1,-1}h_{0,-1} + s_{0,-2}h_{1,0} + s_{0,-1}h_{1,-1} + s_{0,0}h_{-1,-2} + s_{1,0}h_{0,-2} + s_{-1,-2}h_{2,0} + s_{-1,-1}h_{2,-1} + s_{-1,0}h_{2,-2} = s_{1,-2}^{\circ}, \\ s_{0,-2}h_{0,0} + s_{0,-1}h_{0,-1} + s_{-1,-2}h_{1,0} + s_{-1,-1}h_{1,-1} + s_{-1,0}h_{-1,-2} + s_{0,0}h_{0,-2} + s_{-2,-2}h_{2,0} + s_{-2,-1}h_{2,-1} + s_{-2,0}h_{2,-2} = s_{0,-2}^{\circ}, \\ s_{2,0}h_{0,0} + s_{2,1}h_{0,-1} + s_{1,0}h_{1,0} + s_{1,1}h_{1,-1} + s_{1,2}h_{-1,-2} + s_{2,2}h_{0,-2} + s_{0,0}h_{2,0} + s_{0,1}h_{2,-1} + s_{0,2}h_{2,-2} = s_{2,0}^{\circ}, \\ s_{2,-1}h_{0,0} + s_{2,0}h_{0,-1} + s_{1,-1}h_{1,0} + s_{1,0}h_{1,-1} + s_{1,1}h_{-1,-2} + s_{2,1}h_{0,-2} + s_{0,-1}h_{2,0} + s_{0,0}h_{2,-1} + s_{0,1}h_{2,-2} = s_{2,-1}^{\circ}, \\ s_{2,-2}h_{0,0} + s_{2,-1}h_{0,-1} + s_{1,-2}h_{1,0} + s_{1,-1}h_{1,-1} + s_{1,0}h_{-1,-2} + s_{2,0}h_{0,-2} + s_{0,-2}h_{2,0} + s_{0,-1}h_{2,-1} + s_{0,0}h_{2,-2} = s_{2,-2}^{\circ}. \end{array} \right.$$

Несмотря на то, что набор коэффициентов уравнений обеих систем аналогичен, их компоновка с неизвестными и свободными слагаемыми различна. Один и тот же набор отсчетов $s_{i,j}$ в совокупности с разными наборами отсчетов $s_{i,j}^{\circ}$ определяет *разные фильтры одинаковой апертуры*. При увеличении апертуры наборы отсчетов $s_{i,j}$ будут существенно отличаться.

Проиллюстрируем работу фильтров одинаковой апертуры, но различных конфигураций, на примере обработки реального

Первая система линейных уравнений получена для случая формирования выходного отсчета в точке с координатами $F = (0,0)$. Вторая система получается, если выходной отсчет формируется в точке с координатами $F = (-1,1)$:

изображения «Животные» [10], представленного на рис. 4.

Изображение содержит группы животных (оленей), на нем прямоугольником выделен фрагмент для последующего анализа и строка №214, проходящая через данный фрагмент.

Выбор апертуры фильтра, размера эталонного изображения и правило обработки выходного видеосигнала обоснованы в работе [9].



Рис.3. Изображение «Животные»

На рис. 4 приведены результаты обработки выделенного фрагмента четырьмя

фильтрами различных конфигураций с одинаковой апертурой $A_h = 41 \times 27$.

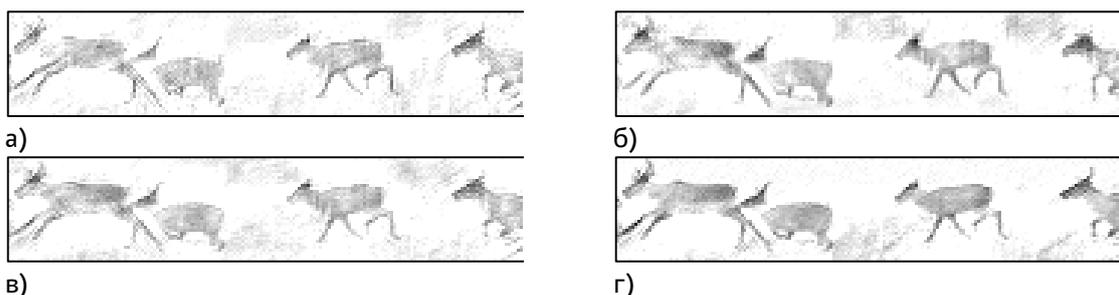


Рис.4. Результаты обработки фрагмента изображения «Животные» фильтрами с апертурой $A_h = 41 \times 27$ при различном положении «формирующего» элемента:

- а) $F = (0,0)$, б) $F = (-20,13)$,
 в) $F = (-20,0)$, г) $F = (-20,-13)$

На рис. 5а-в представлены выходные видеосигналы строки №214 в пределах выделенного на рис. 3 фрагмента изображения «Животные». Сплошными линиями показаны видеосигналы, полученные при обработке тремя анизотропными фильтрами с разными «формирующими» элементами; штриховой линией на каждом из рисунков показан выходной видеосигнал изотропного фильтра для той же строки. Анализ рис. 4 показывает, что визуально лучший результат обработки демонстрирует ДДФ с формирующим элемен-

том $F=(-20,-13)$ (рис. 4,г), на котором четко выделены все четыре объекта. Кроме того, в верхней и левой частях обработанного фрагмента наиболее слабо выражены краевые эффекты по сравнению с рис. 4,а-в. Это подтверждается анализом видеосигналов строк: уровень видеосигналов для 2-го, 3-го и 4-го объектов на рис. 5, в существенно превышает соответствующие уровни на рис. 5, а-б. Однако необходим некий количественный критерий, позволяющий целостно оценивать результаты обработки.

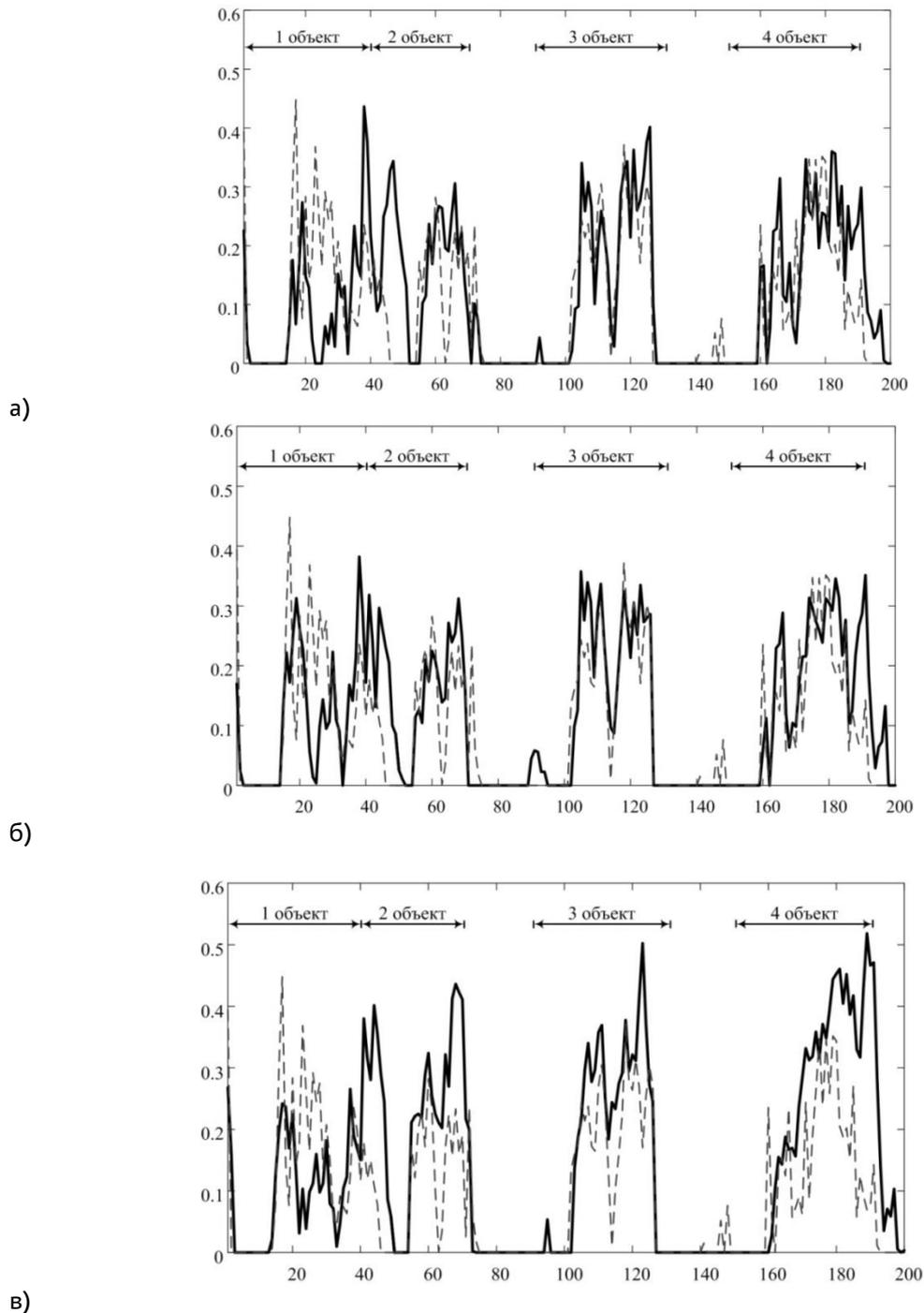


Рис.5. Выходные видеосигналы строки № 214 в пределах выделенного фрагмента при изотропной (штриховая линия) и анизотропной фильтрации (сплошные линии): а) $F = (-20, 13)$; б) $F = (-20, 0)$; в) $F = (-20, -13)$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве меры эффективности обработки предлагается рассмотреть отношение суммарной яркости пикселей

обработанного изображения внутри областей, каждая из которых содержит единственный объект, к яркости фона вне этих областей. Такой показатель описывается выражением:

$$\sigma_r = \sum_{(m,n) \in \Omega_r} f_{m,n}^{\text{ВЫХ}} \left(\sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N f_{m,n}^{\text{ВЫХ}} - \sum_{r=1}^R \sum_{(m,n) \in \Omega_r} f_{m,n}^{\text{ВЫХ}} \right)^{-1},$$

где Ω_r – область входного изображения, содержащая единственный объект интереса; r – номер объекта интереса, $r \in \{1, 2, \dots, R\}$. На рис. 6 представлены столбчатые диаграммы

вычисленных по (5) показателей $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ для четырех объектов выделенного фрагмента тестового изображения «Животные».

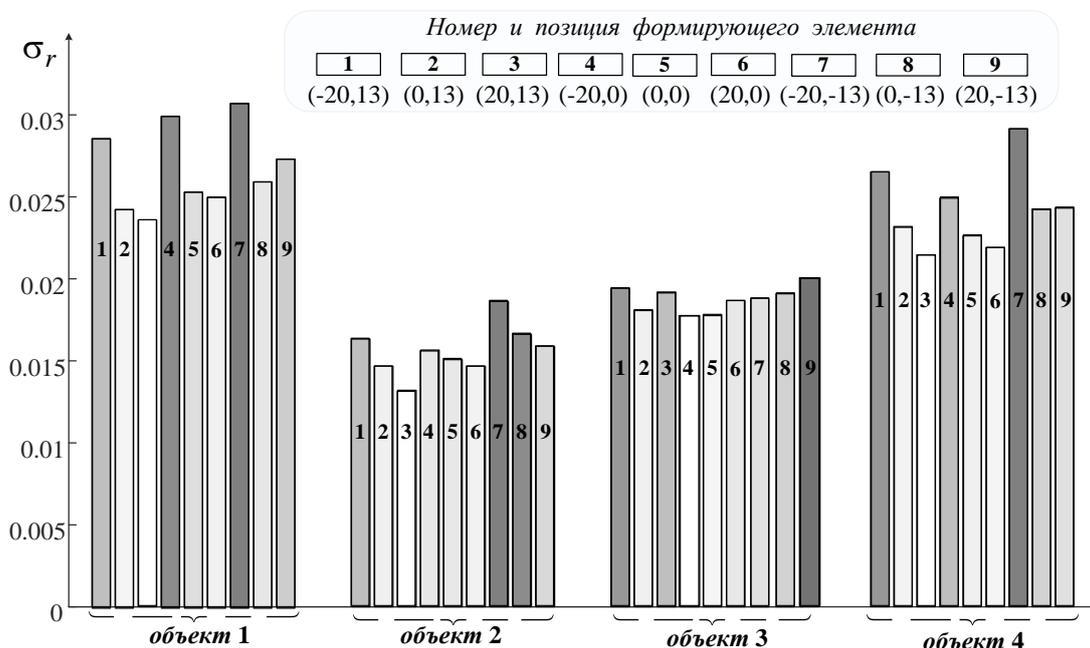


Рис.6. Показатели эффективности обработки фильтрами различных конфигураций

Сравнительный анализ величин показателя (5) на рис. 6 показывает:

- ДДФ с формирующим элементом $F = (20,13)$ характеризуется меньшим значением показателя σ_r в областях локализации объектов (за исключением объекта №3);
- ДДФ с формирующим элементом $F = (-20,-13)$ имеет наибольшее значение показателя σ_r (также за исключением объекта №3);
- для ДДФ с формирующим элементом $F = (0,0)$, т.е. изотропного фильтра, результаты оказались «хуже среднего».

Предложенный механизм изменения конфигурации ДДФ позволяет обрабатывать изображения с использованием только достоверных отсчетов. Качественный уровень восприятия результатов обработки реконфигури-

рованными фильтрами подтверждается путем анализа областей локализации объектов на изображениях.

ВЫВОДЫ

В работе предложен механизм конфигурирования дискретных двумерных фильтров в зависимости от выбора позиции формирующего элемента в апертуре. Он позволяет производить обработку изображений с использованием только достоверных отсчетов, что особенно важно для областей краевых эффектов. Разработанный механизм конфигурирования может быть адаптирован к решению задачи разделения образов близко расположенных объектов по всему полю обрабатываемого изображения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – Издание 3-е, исправленное и дополненное. Москва: Техносфера, 2019. – 1104 с. – Текст: непосредственный.
2. Segmentation and object recognition using edge detection techniques / Y. Ramadevi, T. Sridevi, B. Poornima, B. Kalyani. – Текст: непосредственный. // International Journal of Computer & Information Technology (IJCSIT). – 2010. – Vol. 2. – N 6. – Pp.153–161. DOI: 10.5121/ijcsit.2010.2614
3. Разработка и анализ методов выделения объектов изображения / М.И. Хотилин, Р.А. Парингер, И.А. Рыцарев, Н.С. – Текст: непосредственный // Материалы IV Международ. конф. ИТНТ-2018. Самара, 2018. – С. 2581–2589.
4. Obukhova, N.A. Two-stage method for polyps segmentation in endoscopic images / N.A. Obukhova,

- A.A. Motyko, A.A. Pozdeev. – Текст: непосредственный // Computer Vision in Control Systems-6. Intelligent Systems Reference Library. Springer. – 2020. – Vol. 182. – Pp.93-106. DOI: 10.1007/978-3-030-39177-5_8.
5. Батищев, Д.С. Метод сегментации перекрывающихся форменных элементов крови на микроскопических медицинских изображениях / Д.С. Батищев, В.М. Михелев, А.А. Утянский. – Текст: непосредственный // Экономика. Информатика. – 2020.– Т. 47 (4). – С. 803–815. DOI: 10.18413/2687-0932-2020-47-4-803-815.
 6. Favorskaya, M.N. Semantic segmentation of multispectral satellite images for land use analysis based on embedded information / M.N. Favorskaya, A.G. Zotin. – Текст: непосредственный // Procedia Computer Science. 25th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems (KES-2021). Elsevier. – 2021. – Vol. 192. – Pp. 1504-1513. DOI: 10.1016/j.procs.2021.08.154.
 7. Обработка многомерных сигналов. В 2-х книгах. Кн.1. Линейная многомерная дискретная обработка сигналов. Методы анализа и синтеза / Под ред. А.В. Богословского. Москва: Радиотехника, 2013. – 168 с. – Текст: непосредственный.
 8. Анизотропная дискретная фильтрация / М.А. Пантюхин, А.В. Богословский, И.В. Жигулина, Е.С. Легостаева. – Текст: непосредственный // Радиотехника. 2023. № 3. С. 122–131. DOI: 10.18127/j00338486-202303-12.
 9. Пантюхин, М.А. Двумерная дискретная фильтрация тестовых изображений / М.А. Пантюхин, А.В. Богословский, И.В. Жигулина. – Текст: непосредственный // Радиотехника. – 2020. – № 3(5). – С. 64–72. DOI: 10.18127/j00338486-202003(05)-07
 10. Входное изображение «Животные». URL: https://image.fhserv.ru/hunting/2015-05-af0458075f983442f3c9e200d6d9b92e__rsu-1000-800.jpg (дата обращения: 09.04.23). – Текст электронный.

REFERENCES

1. Gonzalez, R. Digital image processing / R. Gonzalez, R. Woods. – 3rd edition, corrected and supplemented. Moscow: Technosphere, 2019. – 1104 p. (in Russian)
2. Segmentation and object recognition using edge detection techniques / Y. Ramadevi, T. Sridevi, B. Poornima, B. Kalyani // International Journal of Computer & Information Technology (IJCSIT). – 2010.– Vol. 2.–No 6.– Pp.153–161. DOI: 10.5121/ijcsit.2010.2614
3. Development and analysis of methods for selecting image objects / M.I. Khotilin, R.A. Paringer, I.A. Knyazarev, N.S // Materials of the IV International. conf. ITNT-2018. Samara, 2018. – P. 2581-2589. (in Russian)
4. Obukhova, N.A. Two-stage method for polyps segmentation in endoscopic images / N.A. Obukhova, A.A. Motyko, A.A. Pozdeev // Computer Vision in Control Systems-6. Intelligent Systems Reference Library. Springer. – 2020. – Vol. 182. – P.93 – 106. DOI: 10.1007/978-3-030-39177-5_8.
5. Batishchev, D.S. Method of segmentation of overlapping shaped blood elements on microscopic medical images / D.S. Batishchev, V.M. Mikhelev, A.A. Utyansky // Economy. Computer science. – 2020.– Vol. 47 (4). – P. 803-815. DOI: 10.18413/2687-0932-2020-47-4-803-815. (in Russian)
6. Favorskaya, M.N. Semantic segmentation of multispectral satellite images for land use analysis based on embedded information / M.N. Favorskaya, A.G. Zotin // Procedia Computer Science. 25th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems (KES-2021). Elsevier. – 2021. – Vol. 192. – Pp. 1504-1513. DOI: 10.1016/j.procs.2021.08.154.
7. Processing of multidimensional signals. In 2 books. Book 1. Linear multidimensional discrete signal processing. Methods of analysis and synthesis / Edited by A.V. Bogoslovsky. Moscow: Radio Engineering, 2013. – 168 p. (in Russian)
8. Anisotropic discrete filtration / M.A. Pantyukhin, A.V. Bogoslovsky, I.V. Zhigulina, E.S. Legostaeva // Radio engineering. 2023. No. 3. pp. 122-131. DOI: 10.18127/j00338486-202303-12. (in Russian)
9. Pantyukhin, M.A. Two-dimensional discrete filtering of test images / M.A. Pantyukhin, A.V. Bogoslovsky, I.V. Zhigulina // Radio engineering. – 2020. – No 3(5). – Pp. 64-72. DOI: 10.18127/j00338486-202003(05)-07. (in Russian)
10. The input image is "Animals". URL: https://image.fhserv.ru/hunting/2015-05-af0458075f983442f3c9e200d6d9b92e__rsu-1000-800.jpg (date of reference: 09.04.23). (in Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, ORCID, Email)
Пантюхин М.А.	к.т.н., доцент, pull-request@mail.ru
Богословский А.В.	д.т.н., профессор,  0000-0002-2008-717X , p-digim@mail.ru
Жигулина И. В.	к.т.н., доцент, ira_zhigulina@mail.ru
Легостаева Е.С.	legelen36@gmail.com

AUTHORS INFORMATION

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, ORCID, Email)
Pantyukhin M.A..	PhD, Assistant professor, pull-request@mail.ru
Bogoslovsky A.V.	DSc, Professor,  0000-0002-2008-717X , p-digim@mail.ru
Zhigulina I.V.	PhD, Assistant professor, ira_zhigulina@mail.ru
Legostaeva E.S.	legelen36@gmail.com

ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ В НЕЧЕТКИХ УСЛОВИЯХ

Боровик В.В. ¹
Смирнова П.М. ¹refhesx@mail.ru
polayou00@mail.ru

¹Тверской государственной технической университет, наб. Афанасия Никитина, д.22, Тверь, 170026, Россия, кафедра Информационных Систем

Аннотация рассматривается задача оптимизации в нечетких условиях, а также анализ данных, полученных в процессе работы. Актуальность математического моделирования растет с каждым годом, принимая во внимание сложность изучаемых процессов. Таким образом, можно сказать, что принятие решений в нечетких условиях, рассмотренное с точки зрения фундаментальных концепций Р. Беллмана и Л. Заде, будет современным и актуальным подходом к решению подобных задач. Проблема выбора из множества альтернатив является часто используемой задачей, применяемой в различных сферах человеческой жизни. Главной особенностью такого рода заданий является расплывчатость условий, невозможность установить четкие границы. В данной работе рассматривается задача оптимизации, которая заключается в минимизации критерия, представляющего потери при физическом развитии процесса. При рассмотрении математической модели некоторого статического процесса с более общей точки зрения принятия решений в нечеткой среде.

Ключевые слова: оптимизация в нечетких условиях, статические режимы, построение решения, математическая модель, оптимизация конкретного статического процесса.

DECISION-MAKING IN FUZZY CONDITIONS

Borovik V.V. ¹
Smirnova P.M. ¹refhesx@mail.ru
polayou00@mail.ru

¹The Tver State Technical University, Russian Federation 170026, Tver region, Tver city, nab. Afanasia Nikitina, 22, Department of Information systems

Abstract considers the optimization problem in fuzzy conditions, as well as the analysis of the data obtained in the process of work. The relevance of mathematical modeling is growing every year, taking into account the complexity of the studied processes. Thus, we can say that decision-making in fuzzy conditions, considered from the point of view of the fundamental concepts of R. Bellman and L. Zadeh, will be a modern and relevant approach to solving such problems. The problem of choosing on a variety of alternatives is a frequently used task applied in various spheres of human life. The main feature of this kind of tasks is the vagueness of the conditions, the inability to establish clear boundaries. In this paper, the optimization problem is considered, which consists in minimizing the criterion that represents losses during the physical development of the process. When considering a mathematical model of a certain static process from a more general standpoint of decision-making in fuzzy conditions, another logical scheme seems natural, the most important feature of which is symmetry with respect to goals and constraints. The object of the research work is the process of optimizing a specific static process. The purpose of this work is to propose a decision-making model in fuzzy conditions that will take into account the confluence of goals and constraints. To achieve this goal, theoretical material was studied, on the basis of which the most suitable method for solving the optimization problem in fuzzy conditions was chosen. The result of the work carried out will be a constructed fuzzy set of static optimization problems and analysis of the data obtained.

Key words : optimization in fuzzy conditions, static modes, solution construction, mathematical model.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие экономики и изменение образа жизнедеятельности человека, происходящие вследствие повышения эффективности и рационализации процессов, влекут за собой повышение интереса к математическому моделированию, в связи с увеличивающейся сложностью изучаемых процессов. Известны многочисленные работы, посвященные моделированию систем в различных областях: производство различных полимеров, описа-

ние экономических моделей стран, поведения человека и многие другие [1–5].

В приведенных выше работах задача состоит из модели процесса, критерия качества, который представляет собой или потерю, или выгоду, а также систему ограничений. Основной проблемой построения корректной модели является их возрастающая сложность при реальном моделировании [3].

Выход системы, то есть ее результирующее значение, зависящее от входных пара-

метров, можно выразить только при использовании различных численных методов [3, 4, 6].

Посредством такого выражения мы получаем некоторую зависимость лишь приближённо, то есть приближенное равенство. Причем это приближение, то есть неточность результата, не связана с возникающими случайностями, а в большей мере с тем, что описываемые процессы не ставят абсолютно четких границ, что не даёт нам возможности полностью отсечь нам неподходящие множества значений [7]. В результате мы оказываемся в некотором множестве нечетких условий.

Поскольку получаемое соотношение вход выход включает в себя нечеткие данные, нашим результатом будет лишь получение условного входа и выхода, и тогда мы сталкиваемся с проблемой возникновения ошибки. Поэтому для наиболее удобного решения возникших перед нами сложностей будет рассмотрение этой задачи как задачи рассматриваемую в нечетких условиях, что и будет изложено в нашей статье.

Выбор данного подхода приводит нас к тому, что используемые нами математические методы теории нечетких множеств, сильно отличаются от методов теории вероятностей применяемых для решения схожих задач.

Такие методы во многих отношениях проще поскольку, понятию вероятностной меры в теории вероятностей соответствует более простое понятие функции принадлежности чем в теории нечетких множеств. Кроме того, вместо обычных операций $a+b$ и ab , где a и b — действительные числа, используются более простые операции $\text{Max}(a,b)$ и $\text{Min}(a,b)$. По этой причине с имеющейся нечеткостью, удобнее оперировать при помощи методов теории нечетких множеств, даже в тех случаях, когда нечеткость в процессе принятия решений может быть представлена вероятностной моделью.

Целью данной статьи будет являться рассмотрение оптимизационной задачи в нечетких условиях, а также последующий анализ полученных в процессе работы данных. В данной статье мы будем опираться на принципы работы с нечеткими множествами, предложенными Р. Беллманом и Л. Заде. [7].

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для достижения поставленной нами цели, рассмотрим математическую модель некоего статического процесса.

Условно запишем математическую модель в операторной форме:

$$f(y, u) = 0 \quad (1)$$

где u — входная переменная, а y — выходная.

Предположим, что задача оптимизации заключается в минимизации критерия (2), представляющего собой потери при физическом развитии процесса:

$$g(y, u) \rightarrow \min. \quad (2)$$

Поскольку в общепринятом подходе главными элементами процесса принятия решения являются: множество альтернатив, множество ограничений, которые необходимо учитывать при выборе между различными альтернативами, и функция предпочтительности, ставящая каждой альтернативе в соответствие выигрыш (или проигрыш), который будет получен в результате выбора этой альтернативы.

При рассмотрении этого процесса с более общих позиций принятия решений в нечетких условиях естественной представляется другая логическая схема, важнейшей чертой которой является симметрия по отношению к целям и ограничениям. Эта симметрия устраняет различия между целями и ограничениями и позволяет довольно просто сформировать на их основе решение.

При обычном подходе функция предпочтительности, используемая в процессе принятия решения, служит для установления линейной упорядоченности на множестве альтернатив. Очевидно, что функция принадлежности нечеткой цели выполняет ту же задачу и, конечно, может быть получена из функции предпочтительности с помощью нормализации, сохраняющей установленную линейную упорядоченность. В сущности, такая нормализация приводит к общему знаменателю различные цели и ограничения и позволяет, таким образом, обращаться с ними одинаковым образом. Как мы увидим, это является важным аргументом в пользу того, чтобы в качестве одного из основных компонентов в логической схеме принятия решений в нечетких условиях пользоваться понятием цели, а не функции предпочтительности.

Процессы принятия решений, в которых тем или иным образом присутствует нечеткость, могут изучаться с различных точек зрения. В настоящей статье основное внимание уделяется введению трех фундаментальных понятий — нечеткой цели, нечеткого ограничения и нечеткого решения, а также исследованию их применения к многошаго-

вым процессам принятия решений, в которых цели или ограничения могут быть нечетко определенными, а управляемая система может быть либо детерминированной, либо стохастической. Это, однако, не накладывает существенных ограничений на применимость концепций и методов.

Рассмотрим три основных понятия: нечеткой цели, нечеткого ограничения и нечеткого решения [7].

Заметим, что в подавляющем большинстве практических ситуаций модель (1) сложна и её разрешение требует привлечения специальных вычислительных методов [2, 4, 8]. В этом случае мы имеем приближённое соотношение:

$$y \cong F(u) \quad (3)$$

Под нечеткой целью подразумевается цель, которую можно описать как нечеткое множество в соответствующем пространстве значений, где обозначают соответственно переменную состояния и входную переменную в момент времени n и для простоты предполагаются вещественно-значимыми.

Предположим, что нечеткая цель состоит в том, чтобы выполнить следующее равенство (1), начиная с исходного состояния. В этом случае задача заключается в нахождении такой последовательности входов, которая будет, как можно более близко реализовать установленную цель с учетом наложенных ограничений (2) на входы.

В нашем случае нечеткая цель G представляет собой условное множество по u в пространстве значений y , представим ее так:

$$\mu_G(y|u) \quad (4)$$

Аналогично, согласно формуле (3) нечеткое ограничение C будет представлять собой условное множество по u в пространстве y . Функции принадлежности мы обозначим как:

$$\mu_C(y|u) \quad (5)$$

Таким образом, задача статической оптимизации превращается в задачу принятия решений в нечётких условиях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обратимся теперь к понятию решения. Интуитивно ясно, что решение — это по существу выбор одной или нескольких из имеющихся альтернатив. Предыдущий пример наводит на мысль, что нечеткое решение, или просто решение, следует определить, как нечеткое множество в пространстве альтерна-

тив, получающееся в результате пересечения заданных целей и ограничений.

Определение. Пусть в пространстве альтернатив Y заданы нечеткая цель G и нечетко определенное ограничение C . Тогда нечеткое множество, образуемое пересечением, называется решением. В символической форме:

$$D = G(u) \cap C(u) \quad (7)$$

Если исходная задача сводилась к минимизации функции потерь (4) при ограничении (5), то с учетом нечеткого ограничения мы перепишем эту задачу в эквивалентном нечетком условном виде. Для этого, прежде всего, определим нечёткое множество D в пространстве Y , условное по u , с функцией принадлежности $\mu_D(y,u)$.

$$\mu_D(y|u) = \min[\mu_G(y|u), \mu_C(y|u)] \quad (8)$$

Оптимальное решение мы определим через максимум μ_D по u . Зададим какое-то значение y и построение максимизации. Получив таким образом набор значений $\mu_D^*(y)$ мы строим принадлежность этого множества (функции), задав то или иное значение мы будем уже знать, что более выгодно (благоприятно).

$$\mu_D^* = \max \mu_D(y|u) \quad (9)$$

При построении функции μ_D^* согласно формуле (9) мы видим, что функция будет непрерывной, но не будет дифференцируема, следовательно для нахождения наиболее оптимального решения нужно применять специальные методы без вычисления производных.

Рассмотрим несколько методов, алгоритмы решения задачи оптимизации в которых опираются на получение значение самой функции и, следовательно, для их использования не требуется вычисление дифференцируемость самой функции. Для этого будем использовать вычислительные процедуры, в которых выбор приближения к оптимальному значению определяется сравнением значений функции в нескольких точках пространства E_n .

Метод минимизации по правильному симплексу, вершину u^0 возьмем как базовую, координаты остальных n вершин u^0, \dots, u^n вычисляются по формулам:

$$u_j^i = \begin{cases} u_j^0 + d_1, & i \neq j \\ u_j^0 + d_2, & i = j \end{cases}$$

где $d_1 = \frac{a(\sqrt{n+1}-1)}{n\sqrt{2}}$, $d_2 = \frac{a(\sqrt{n+1}+n-1)}{n\sqrt{2}}$, a — длина ребра.

После вычисления координат вершин симплекса, строится новый симплекс методом отражения какой-либо вершины, симметрично относительно центра тяжести u^c остальных вершин симплекса.

Нужная точка, то есть точка минимума функции $f(u)$, находится с помощью правильных симплексов следующим образом. При каждой проведенной итерации проводится сравнение значения $f(u)$ в вершинах симплекса. Затем описанную выше процедуру отражения проводят для той вершины, в которой значение функции принимает наибольшее значение. Если получаемое в отраженной вершине значение функции меньше, переходят к новому симплексу. В обратном случае проводится еще одна операция отражения для вершины со следующим по величине значением $f(u)$. В случае получения неподходящего значения функции, сокращают длину ребра симплекса, например, в двое и строят новый симплекс с этим ребром. Базовой вершиной u^0 назначают ту вершину старого симплекса, значение функции в которой было наименьшим. Поиск проводится до тех пор, пока, либо ребро симплекса, либо разность между значениями

функции в вершинах симплекса станут достаточно малыми [8, 9].

Метод циклического покоординатного спуска, заключается в последовательной минимизации целевой функции $f(u)$ по базисным векторам e^n , после окончания минимизации по базисным векторам цикл повторяется.

Однако эффективность этого метода сильно зависит от свойств целевой функции, и для увеличения эффективности можно применять последующий покоординатный поиск для нахождения направления убывания, например, алгоритм Хука-Дживса. Данный алгоритм исследует покоординатный поиск в окрестности выбранной точки, для определения направления убывания и, следовательно, перемещение в этом направлении [10].

ВЫВОДЫ

После проведенного нами исследования и изучения общей модели статического процесса в рамках задачи оптимизации, нами было получено нечеткое множество и предложен алгоритм построения функции принадлежности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оценка влияния ионизирующих излучений на вязкоупругие свойства вулканизаторов / С. Л. Подвальный, С. Г. Тихомиров, О. В. Карманова, [и др.]. – Текст: непосредственный // Известия российской академии наук. – 2019. – Т. 83. – №. 9. – С. 1232–1234.
2. Айвазян, С.А. Метод кластеризации регионов РФ с учетом отраслевой структуры / С. А. Айвазян, М. Ю. Афанасьев, А.В. Кудров.– Текст: непосредственный // Прикладная эконометрика. – 2016. №1 (41).– С.24–46.
3. Математическая модель крупноэтажной пиролизной установки в производстве этилена / Д.В. Арапов, С.Г. Тихомиров, С.Л. Подвальный, В.А. Курицын. – Текст: непосредственный // Воронеж: ООО «Вэлборн», сборник трудов Международной научно-технической конференции. – Воронеж, 18–20 декабря 2017. – С. 510-516.
4. Синтез Марковской модели термохимической деструкции полимера в растворе / В.К. Битюков, А.А. Хвостов, С.Г. Тихомиров, [и др.]. – Текст: непосредственный // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2017. – 79(3). – С. 57–64.
5. Кирьянова В.С. Моделирование и управление процессами пиролиза в производстве этилена / В.С. Кирьянова, С.Г. Тихомиров. – Текст: непосредственный// Уфа: Стерлитамакский филиал ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет», сборник трудов Международной научно-технической конференции «Математическое моделирование процессов и систем», Уфа, 07-09 декабря. – С.61– 65.
6. Оценка диссипации механической энергии при переработке высоковязких неньютоновских средств валковым смесителе / А.А. Хвостов, В.И. Рязских, А.А. Журавлев, И.А. Хаустов, конференция: «Моделирование энергоинформационных процессов», Воронеж, 21-23 декабря 2021. –С.1–397.
7. Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях / Р. Беллман, Л. Заде.– Текст: непосредственный. – Москва:Мир,1976. – 189 с.
8. Аоки, М. Введение в методы оптимизации / М. Аоки.– Издательство:Москва: Наука, 1977. – С.167–190. Текст: непосредственный.
9. Скобельцын. Численные методы в физике и радиофизике / Г.М. Тептин, О.Г. Хуторова, Ю.М. Стенин, [и др.], Учебно-методическое пособие. – Казань: КФУ, 2013. – С. 14–28.

10. Гончаров, В.А. Методы оптимизации / В.А. Гончаров. – Москва, Учебное пособие, Московский государственный институт электронной техники (технический университет) издательство, Москва 2008. – С.16–30. Текст: непосредственный

REFERENCES

1. Assessment of the influence of ionizing radiation on the viscoelastic properties of vulcanizers / S. L. Podvalny, S. G. Tikhomirov, O. V. Karmanova, [et al.] // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. – 2019. – Vol. 83. – No 9. – P. 1232-1234. (in Russia)
2. Ayvazyan, S.A. Method of clustering of regions of the Russian Federation taking into account the sectoral structure / C. A. Ayvazyan, M. Yu. Afanasyev, A.V. Kudrov. // Applied Econometrics. – 2016. №1 (41).– P.24–46. (in Russia)
3. Mathematical model of a large-storey pyrolysis plant in the production of ethylene / D.V. Arapov, S.G. Tikhomirov, S.L. Podvalny, V.A. Kuritsyn // Voronezh: LLC "Valborn", proceedings of the International Scientific and Technical Conference. – Voronezh, December 18-20, 2017. – P. 510-516. (in Russia)
4. Synthesis of the Markov model of thermochemical destruction of polymer in solution / V.K. Bityukov, A.A. Khvostov, C.G. Tikhomirov, [et al.] // Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. – 2017. (in Russia)
5. Kiryanova V.S. Modeling and control of pyrolysis processes in the production of ethylene / V.S. Kiryanova, S.G. Tikhomirov. – Text: direct// Ufa: Sterlitama branch of the Bashkir State University, proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Mathematical Modeling of processes and systems", Ufa, December 07-09. – pp.61-65. (in Russia)
6. Evaluation of mechanical energy dissipation during processing of high-viscosity non-Newtonian means in a roller mixer / A.A. Khvostov, V.I. Ryazhskikh, A.A. Zhuravlev, I.A. Khaustov, conference: "Modeling of energy-informational processes", Voronezh, December 21-23, 2021. -P.1-397. (in Russia)
7. Bellman R., Zadeh L. Decision-making in vague conditions / R. Bellman, L. Zadeh. – Moscow: Mir, 1976. – 189 p. (in Russia)
8. Aoki, M. Introduction to optimization methods / M. Aoki.– Publishing House: Moscow: Nauka, 1977. – P.167–190. (in Russia)
9. Skobeltsyn. Numerical methods in physics and radiophysics / G.M. Teptin, O.G. Khutorova, Yu.M. Stenin, [et al.], Educational and methodological manual. – Kazan: KFU, 2013. – P. 14-28. (in Russia)
10. Goncharov, V.A. Optimization methods / V.A. Goncharov. – Moscow, Textbook, Moscow State Institute of Electronic Technology (Technical University) Publishing House, Moscow 2008.–3.16–30. (in Russia)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФИО	Сведения (Email)
Боровик В.В.	refhesx@mail.ru
Смирнова П.М.	polayou00@mail.ru

AUTHORS INFORMATION

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, ORCID, Email)
Borovik V.V.	refhesx@mail.ru
Smirnova P.M.	polayou00@mail.ru

ВЫБОР ПОДВИЖНОЙ ФАЗЫ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ АНЕСТЕТИКОВ МЕТОДОМ ХРОМАТОГРАФИИ В ТОНКОМ СЛОЕ

Санникова Н.Ю.	1	 https://0000-0002-5583-2563	сnu@inbox.ru
Суханов П.Т.	1	 https://0000-0002-2588-9286	pavel.suhanov@mail.ru
Чибисова Т.В.	2	-	tatya-chibiso@yandex.ru

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, проспект Революции, д.19, Воронеж, 394036, Россия, кафедра технологии органического синтеза, переработки полимеров и техно-сферной безопасности

² Воронежский государственный университет инженерных технологий, проспект Революции, д.19, Воронеж, 394036, Россия, кафедра физической и аналитической химии

Аннотация: в работе предложен способ селективного определения местных анестетиков amino-амидной и amino-эфирной структуры, основанный на извлечении аналитов из растворов со сложной многокомпонентной матрицей бинарной смесью экстрагентов с последующим хроматографическим анализом. Для наиболее полного извлечения анестетиков применены смеси, состоящие из пропилового спирта и диметилкетона в объемном соотношении 0,2 : 0,8 об.д. соответственно. Более полное выделение экстрактов из анализируемых растворов обеспечивалось введением сульфата аммония (высаливатель). Для определения местных анестетиков в концентратах применен метод хроматографии в тонком слое. Установлено, что более полное разделение смеси анестетиков достигается при элюировании двух- и трехкомпонентными системами. Для выбора эффективных подвижных фаз проведено симплекс-решетчатое планирование эксперимента. В качестве математической модели «состав подвижной фазы – коэффициент подвижности» применяли кубическую модель для q-компонентной смеси. Получены уравнения регрессии, характеризующие состав трехкомпонентной подвижной фазы для разделения анестетиков (программа Simplex 3.0). Для наиболее эффективного разделения анестезина, новокаина и лидокаина целесообразно применение подвижных фаз, содержащих 0,05 – 0,5 об. дол. диметилкетона, 0,1 – 0,45 об. дол. ацетонитрила и 0,4 – 0,8 об. дол. гексана. Оценка полученных результатов по критерию Фишера показала, что кубические модели адекватно описывают экспериментальные результаты. Погрешность коэффициентов подвижности анестетиков, полученных при моделировании, по отношению к экспериментально установленным, не превышает 10 %. Диапазон определяемых концентраций анестетиков составляет от 0.1 до 1 мкг/см³, предел обнаружения – 0.02 мкг/см³.

Ключевые слова: местные анестетики, экстракция, хроматография в тонком слое, планирование эксперимента

THE CHOICE OF THE MOBILE PHASE IN THE DETERMINATION OF ANESTHETICS BY CHROMATOGRAPHY IN A THIN LAYER

Sannikova N.Yu.	1	 https://0000-0002-5583-2563	сnu@inbox.ru
Sukhanov P.T.	1	 https://0000-0002-2588-9286	pavel.suhanov@mail.ru
Chibisova T.V.	2	-	tatya-chibiso@yandex.ru

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue, 19, Voronezh, 394036, Russia, Department of Technologies of Organic Synthesis, Polymer Processing and Technosphere Safety

²Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue, 19, Voronezh, 394036, Russia, Department of Physical and Analytical Chemistry

Abstract: the article proposes a method for the selective determination of local anesthetics of amino-amide and amino-ether structure. The method is based on the extraction of analytes from solutions with a complex multicomponent matrix by a binary mixture of extractants followed by chromatographic analysis. For the most complete extraction of anesthetics, mixtures consisting of propyl alcohol: dimethyl ketone in a volume ratio of 0.2: 0.8 vol.d., respectively, were used. A more complete isolation of extracts from the analyzed solutions was provided by the introduction of a salting agent – ammonium sulfate. The method of chromatography in a thin layer for the determination of local anesthetics in concentrates has been studied. It has been established that a more complete separation of the anesthetic mixture is achieved when using two- and three-component systems as eluents. To select effective mobile phases, the authors carried out simplex-lattice planning of the experiment. A cubic model for a q-component mixture was used as a mathematical model of the "composition of the mobile phase - mobility coefficient". Regression equations characterizing the composition of a three-component mobile phase for the separation of anesthetics (Simplex 3.0 program) were obtained. It was found that for the most effective separation of anesthetic, novocaine and lidocaine, it is advisable to use mobile phases containing 0.05 – 0.5 vol. of dimethyl ketone, 0.1 - 0.45 vol. of dollars. acetonitrile and 0.4 – 0.8 vol. dollars of hexane. Evaluation of the results obtained by the Fisher criterion showed that cubic models adequately describe experimental results. The error of the values of the mobility coefficients of

anesthetics obtained during modeling, in relation to the experimentally established ones, does not exceed 10%. The range of detectable concentrations is from 0.1 to 1 microgram/cm³, the detection limit is 0.02 microgram/cm³.

Key words: local anesthetics, extraction, chromatography in a thin layer, experiment planning.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение местных анестетиков в медицине, ветеринарии и фармацевтической промышленности, а также возможное негативное воздействие на организм человека вплоть до анафилактического шока и смертельных отравлений, обуславливает необходимость разработки экспрессных и надежных способов их извлечения и определения, в том числе селективного, в водах, лекарственных препаратах и биологических объектах. Особенно сложно установление концентрации местных анестетиков в биологических объектах при химико-токсикологическом анализе, в частности при расследовании преступлений [1- 7].

Разнообразие объектов анализа (от сточных вод и фармацевтических препаратов до биологических жидкостей и пищевых продуктов) обуславливает необходимость отделения местных анестетиков от мешающих компонентов. В матрицу анализируемого образца могут входить неорганические соединения, добавки различной природы, красители, наполнители, связывающие вещества, примеси белков, продуктов их гидролиза – пептидов и аминокислот, липидов, углеводов, витаминов, ферментов и других соединений [8].

Решение задачи возможно с применением различных способов извлечения, концентрирования и разделения [9]. В современном химико-токсикологическом анализе экстракция широко применяется для изолирования веществ из объектов биологического происхождения, для очистки вытяжек от примесей, для выделения токсических веществ из предварительно очищенных вытяжек. Этот метод применяется также для концентрирования исследуемых веществ из сильно разбавленных растворов [8].

В работе [10] разработаны эффективные экстракционные системы для практически полного извлечения и концентрирования местных анестетиков из водных сред. Предложена методика хроматографического определения их в тонком слое сорбента. В качестве подвижной фазы применены смеси на основе ацетона, ацетонитрила и гексана.

Располагая результатами эксперимента, нами применен метод симплекс-решетчатого планирования для оптимизации состава по-

движной фазы, позволяющей более полно и селективно определять amino-эфирные и amino-амидные анестетики в экстрактах.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объекты исследования: новокаин [2-(диэтиламино) этил-4-амино-бензоата гидрохлорид], лидокаин [2-(диэтиламино)-N-(2,6-диметилфенил)-ацетамид гидрохлорид] и анестезин [4-аминобензойной кислоты этиловый эфир] – местные анестетики, наиболее применяемые в лечебной практике. Новокаин и анестезин – эфиры *n*-аминобензойной кислоты, лидокаин – производное ацетанилида.

Анализ включает подготовку пластин и хроматографической камеры, получение концентрата, нанесение пробы на пластину, хроматографирование [11].

В хроматографическую камеру размером 200·200·100 мм помещали подвижную фазу. Камеру закрывали и оставляли на 30 мин для насыщения парами растворителей. Применяли хроматографические пластины Sorbfil ПТСХ-АФ-А-УФ (Россия) с силикагелем на Al-подложке (150·150 мм), которые предварительно активировали в концентрированном растворе аммиака и высушивали при 100±5 °С. Активированные пластины хранили над слоем силикагеля.

К 5 см³ раствора анализируемого раствора добавляли кристаллический сульфат аммония до насыщения, 0,5 см³ аммонийного буферного раствора и изомолярную смесь пропиловый спирт: диметилкетон (0,2 : 0,8) из расчета объемов водной и органической фаз 5:1 и экстрагировали 5 мин. После расслаивания системы микрошприцем отбирали 0,01 см³ экстракта и наносили его на линию старта активированной хроматографической пластины. Пластину подсушивали на воздухе. Затем помещали ее в камеру и хроматографировали. После достижения подвижной фазой линии финиша пластину извлекали из хроматографической камеры и сушили на воздухе.

Вещества идентифицировали по окраске и коэффициентам подвижности R_f :

$$R_f = \ell/L, \quad (1)$$

где ℓ и L – фронт смещения пятна идентифицируемого анестетика и растворителя соответственно.

Селективность разделения веществ оценивали по коэффициентам разделения α :

$$\alpha = \ell_1 / \ell_2. \quad (2)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Хроматографические системы для разделения выбирали исходя из природы анестетиков. Новокаин и лидокаин – высокогидрофильные соединения, поэтому основу подвижной фазы должен составлять гидрофильный растворитель. Анестезин плохо растворим в воде, что требует введения в систему для хроматографирования гидрофобного компонента [10].

В качестве гидрофобного компонента системы нами предложен гексан, являющийся менее токсичным по сравнению с хлороформом и толуолом (на их основе применяют смеси в качестве подвижных фаз [12, 13]). Гидрофильные растворители – диметилкетон

и ацетонитрил, широко применяются как составляющие подвижных фаз, например, при определении алкалоидов, пестицидов и других веществ [10,14].

Нами применены двух- и трехкомпонентные смеси, состоящие из диметилкетона, ацетонитрила и гексана. Оптимизацию состава подвижной фазы проводили методом симплекс-решетчатого планирования эксперимента. При этом сумма компонентов смеси нормируется и выполняется равенство [15]:

$$\sum_{1 \leq i < q} x_i = 1 \quad (3)$$

где x_i – объемное соотношение i -го компонента смеси.

В качестве математической модели «состав подвижной фазы – коэффициент подвижности» применяли кубическую модель для q -компонентной смеси:

$$y = \sum_{1 \leq i \leq q} \beta_i X_i + \sum_{1 \leq i < j \leq q} \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{1 \leq i < j < k \leq q} \gamma_{ij} X_i X_j (X_i - X_j) + \sum_{1 \leq i < j < k \leq q} \beta_{ijk} X_i X_j X_k \quad (4)$$

где X – масштабированные значения факторов, определяющих функцию отклика и поддающихся варьированию; i, j, k – индексы факторов; q – число компонентов смеси; β и γ – коэффициенты уравнения:

$$\beta_i = y_i \quad (5)$$

$$\beta_{ij} = \frac{9}{4}(3y_{iij} + y_{iij} - y_i - y_j) \quad (6)$$

$$\gamma_{ij} = \frac{9}{4}(3y_{iij} + y_{iij} - y_i + y_j) \quad (7)$$

$$\beta_{ijk} = 27y_{ijk} - \frac{27}{4}(y_{iij} + y_{jjj} + y_{iik} + y_{ikk} + y_{jkk}) + \frac{9}{2}(y_i + y_j + y_k) \quad (8)$$

где y – экспериментально установленные коэффициенты подвижности местных анестетиков.

Матрица планирования эксперимента приведена в таблице 1.

Таблица 1 - Матрица симплекс-решетчатого плана эксперимента третьего порядка ({3,3} решетка)

№ эксперимента	Соотношение компонентов, об. доли			Коэффициент подвижности
	Диметилкетон	Ацетонитрил	Гексан	
1	1	0	0	y_i
2	0	1	0	y_j
3	0	0	1	y_k
4	2/3	1/3	0	y_{iij}
5	1/3	2/3	0	y_{ijj}
6	0	2/3	1/3	y_{iik}
7	0	1/3	2/3	y_{ikk}
8	2/3	0	1/3	y_{jkk}
9	1/3	0	2/3	y_{jjk}
10	1/3	1/3	1/3	y_{ijk}
1	1	0	0	y_i
2	0	1	0	y_j

В результате статистической обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, характеризующие состав анестезин

$$y = 0,91X_1 + 0,15X_2 + 0,97X_3 + 0,16X_1X_2 - 3,02X_1X_3 + 0,59X_2X_3 + 1,19X_1X_2(X_1 - X_2) - 2,16X_1X_3(X_1 - X_3) - 0,72X_2X_3(X_2 - X_3) + 4,21X_1X_2X_3 \quad (9)$$

новокаин

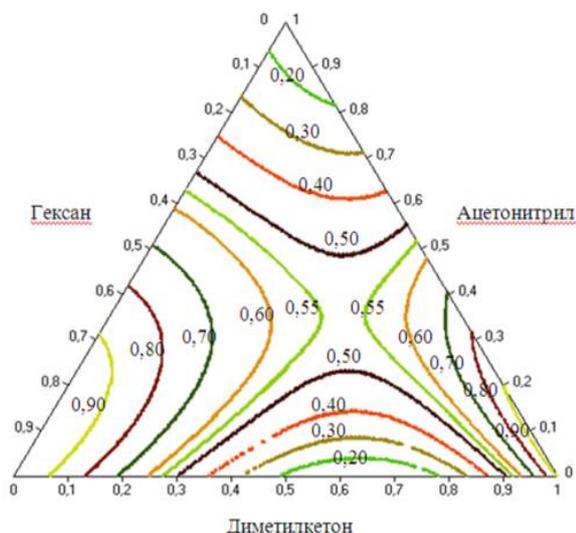
$$y = 0,11X_1 + 0,02X_2 + 1,44X_1X_2 - 0,16X_1X_3 + 0,79X_2X_3 + 1,35X_1X_2(X_1 - X_2) + 0,02X_1X_3 \times (X_1 - X_3) + 1,17X_2X_3(X_2 - X_3) - 7,11X_1X_2X_3 \quad (10)$$

лидокаин

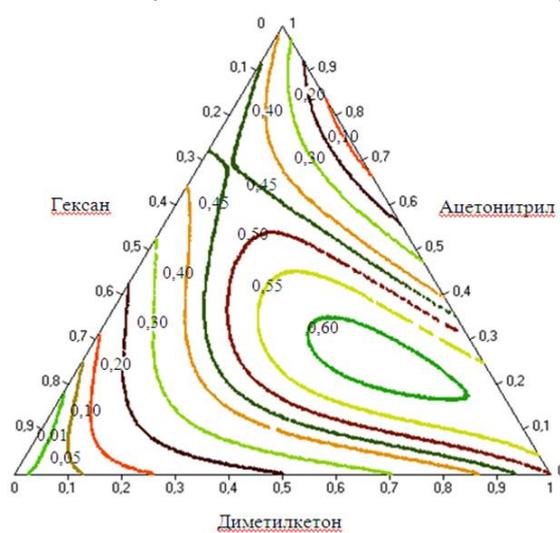
$$y = 0,5X_1 + 0,38X_2 - 0,70X_1X_2 - 0,20X_1X_3 + 0,36X_2X_3 + 2,23X_1X_2(X_1 - X_2) - 0,11X_1X_3 \times (X_1 - X_3) + 1,17X_2X_3(X_2 - X_3) + 9,36X_1X_2X_3 \quad (11)$$

При обработке результатов эксперимента применены статистические критерии: проверка однородности дисперсий – критерий

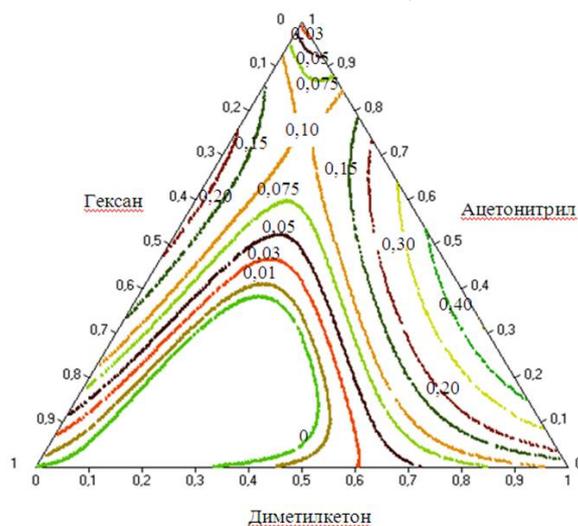
Кохрена, значимость коэффициентов уравнений регрессии – критерий Стьюдента, адекватность уравнений – критерий Фишера [16].



а)



б)



в)

*1 – область отрицательных значений коэффициентов подвижности, где экспериментально установлен $R_f = 0$.
Рисунок 1 – Диаграммы «состав подвижной фазы – коэффициент подвижности» для трехкомпонентной смеси для разделения анестезина (а), лидокаина (б) и новокаина (в).

Для установления состава подвижной фазы уравнения регрессий (9-11) решали относительно переменных X_1 , X_2 и X_3 (интервал значений – от 0 до 1). По полученным значениям строили изолинии на треугольнике концентраций – контурные кривые равных коэффициентов подвижности, позволяющие выбрать состав подвижной фазы (рис. 1),

обеспечивающей наиболее полное разделение анестетиков в смеси.

Для наиболее эффективного разделения анестезина, новокаина и лидокаина целесообразно применение подвижных фаз, содержащих 0,05 – 0,5 об. дол. диметилкетона, 0,1 – 0,45 об. дол. ацетонитрила и 0,4 – 0,8 об. дол. гексана (табл. 2).

Таблица 2 - Расчетные коэффициенты подвижности ($R_{\text{расч}}$) и разделения (α) новокаина (1), лидокаина (2) и анестезина (3) при применении наиболее селективных подвижных фаз

Состав подвижной фазы А:АЦ:Г (об. д.)	$R_{\text{расч}}$			α		
	1	2	3	1 и 2	2 и 3	3 и 1
0,05:0,15:0,80	0,03	0,08	0,94	3	12	32
0,05:0,25:0,70	0,06	0,15	0,90	3	6	15
0,05:0,30:0,65	0,08	0,20	0,87	3	4	11
0,10:0,15:0,75	0	0,15	0,88	106	6	619
0,10:0,20:0,70	0,01	0,20	0,87	20	4	88
0,10:0,25:0,65	0,02	0,24	0,85	12	3	41
0,10:0,30:0,60	0,03	0,29	0,82	9	3	25
0,15:0,35:0,50	0,01	0,41	0,73	33	2	59
0,15:0,45:0,40	0,04	0,47	0,64	12	1	16
0,20:0,40:0,40	0,01	0,50	0,65	55	1	71
0,40:0,25:0,35	0,01	0,58	0,54	75	1	71
0,50:0,10:0,40	0,01	0,44	0,36	49	1	39

Оценка полученных результатов по критерию Фишера показала, что кубические модели адекватно описывают экспериментальные результаты.

Оптимизированная подвижная фаза применена для определения местных анестетиков в водных растворах. Полученные хроматограммы сканировали на планшетном сканере, изображение обрабатывали в программе «Денситометр «Сорбфил». Анестети-

ки идентифицировали по коэффициентам подвижности. Количественный анализ основан на построении хроматограммы трека по отклонению интенсивности окраски пятен в треке от яркости фона пластины с последующим нахождением пиков на этой кривой и расчетом их площади. Расчет производили методом внешнего стандарта [17].

Результаты количественного определения в водных средах приведены в таблице 3.

Таблица 3. Экстракционно-хроматографическое определение местных анестетиков в водных средах методом «введено – найдено»; $n = 3$, $P = 0,95$.

Анестетик	Введено, мкг/см ³	Найдено, мкг/см ³	S_r , %	Δ , %
Новокаин	50,00	48,80 ± 6,45	8	2
	10,00	9,70 ± 1,75	9	3
	2,00	1,95 ± 0,44	9	3
Лидокаин	50,00	49,10 ± 6,30	8	2
	10,00	9,60 ± 2,20	10	4
	2,00	1,93 ± 0,49	10	4
Анестезин	50,00	49,30 ± 6,31	8	1
	10,00	9,90 ± 2,00	9	1
	2,00	1,96 ± 0,36	10	2

ВЫВОДЫ

С применением методов математического планирования эксперимента (симплекс-

решетчатые планы эксперимента третьего порядка ($\{3,3\}$ решетка) оптимизированы составы трехкомпонентной подвижной фазы

для разделения анестетиков методом хроматографии в тонком слое.

Погрешность значений коэффициентов подвижности анестетиков, полученных при моделировании, по отношению к экспериментально установленным, не превышает 10 %. Полученные системы применены для экстрак-

ционно-хроматографического определения новокаина, лидокаина и анестезина в водных растворах. Диапазон определяемых концентраций составил 0,1 – 1 мкг/см³, предел обнаружения 0,02 мкг/см³. Относительная погрешность определения не превышает 10 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Byrne, K. Engelbrecht C. Toxicity of local anaesthetic agents / K. Byrne // [Trends in Anaesthesia and Critical Care](#). – 2013. – Vol. 3. – No1. – P. 25 – 30.
2. Карпук, И.Ю. Аллергические реакции на местные анестетики: диагностика и профилактика / И.Ю. Карпук. – Текст: непосредственный // Вестник Витебского государственного медицинского университета. – 2009. – Т. 8. – № 3. – С. 61 – 68.
3. Аллергические реакции на местные анестетики и методы их диагностики / К.А. Лебедев, И.Д. Понякина, А.В. Митронин, [и др.]. – Текст: непосредственный // Стоматология для всех. – 2005. – № 3. – С. 16 – 22.
4. Митронин, А.В. Оптимизация лабораторной диагностики аллергических реакций на местные анестетики / А.В. Митронин, К.А. Лебедев. – Текст: непосредственный // Эндодонтия Today. – 2004. – № 1 – 2. – С. 71 – 76.
5. Никоноров, С.И. Применение анестезирующих веществ в осетроводстве / С.И. Никоноров, В.О. Климонов, Т.С. Голованова. – Текст: непосредственный // Вопросы рыболовства. – 2005. – Т. 6. – № 3–23. – С. 575 – 598.
6. Воцинина Н.А. Химико-токсикологическое исследование производных п-аминобензойной кислоты (анестезина, новокаина, новокаинамида) : автореф. дис...канд. фармац. наук. Курск : Курск. мед. ун-т., 2000. – 20 с. – Текст: непосредственный.
7. Рыбин, Е.В. Влияние димексида на организм лошадей / Е.В. Рыбин. – Текст: электронный// http://www.rusnauka.com/28_OINXXI_2010/Veterenaria/72596.doc.htm
8. Евстигнеева, В.П. Химико-токсикологический анализ на групповые вещества, изолируемых экстракцией и сорбцией. Наркотические и другие одурманивающие средства / В.П. Евстигнеева, И.В. Шкутина, Т.А. Брежнева. – Воронеж: Вор. гос. ун-т, 2004. – 47 с. – Текст: непосредственный.
9. Золотов, Ю.А. Основы аналитической химии. Общие вопросы. Методы разделения / Ю.А. Золотов. – Москва: Высш. шк., 1999. – 351 с. – Текст: непосредственный.
10. Экстракционно-хроматографическое определение местных анестетиков в водных средах / Я.И. Коренман, Т.В. Чибисова, П.Т. Суханов, [и др.]. – Текст: непосредственный // Аналитика и контроль. – 2013. – Т.17. – № 4. – С. 465 – 471.
11. Сумина, Е.Г. Тонкослойная хроматография. Теоретические основы и практическое применение / Е.Г. Сумина, С.Н. Штыков, Н.В. Тюрина. – Саратов: изд-во Саратов. гос. ун-та, 2006. – 112 с. – Текст: непосредственный.
12. Hille, B. The pH – dependent rate of action of local anesthetics on the node of Ranvier / B. Hille // J. General Physiol. – 1977. – Vol. 69. – No 4. – P. 475 – 496.
13. Schmidt, M. A convenient TLC method for the identification of local anesthetics / M. Schmidt, F. Bracher // Pharmazie. – 2006. – Vol. 61. – No 1. – P. 15 – 17.
14. Выделение, экстракционное концентрирование и определение кофеина при исследовании плазмы крови / Я.И. Коренман, В.К. Шорманов, Н.Я. Мокшина, [и др.]. – Текст: непосредственный // Суд.-мед. экспертиза. – 2012. – № 2. – С. 32 – 35.
15. Макаричев Ю.А. Методы планирование эксперимента и обработки данных / Ю.А. Макаричев, Ю.Н. Иванников. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – 131 с. – Текст: непосредственный.
16. Гумеров, А.М. Математическое моделирование химико-технологических процессов / А.М. Гумеров. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 176 с. – Текст: непосредственный.
17. Денситометр Сорбфил: Руководство пользователя. Сорбполимер: Краснодар, 2006. – 17 с. – Текст: непосредственный.

REFERENCES

1. Byrne, K. Engelbrecht C. Toxicity of local anaesthetic agents / K. Byrne // Trends in Anaesthesia and Critical Care. – 2013. – Vol. 3. – No1. – P. 25-30.

2. Karpuk, I.Y. Allergic reactions to local anesthetics: diagnosis and prevention / I.Y. Karpuk // Bulletin of the Vitebsk State Medical University. – 2009. – Vol. 8. – No. 3. – P. 61-68.
3. Allergic reactions to local anesthetics and methods of their diagnosis / K.A. Lebedev, I.D. Ponyakina, A.V. Mitronin, [et al.]// Dentistry for everyone. - 2005. – No. 3. – P. 16-22.
4. Mitronin, A.V. Optimization of laboratory diagnostics of allergic reactions to local anesthetics / A.V. Mitronin, K.A. Lebedev// Endodontics Today. – 2004. – No 1 – 2. – P. 71-76.
5. Nikonorov, S.I. The use of anesthetic substances in sturgeon breeding / S.I. Nikonorov, V.O. Klimonov, T.S. Golovanova// Fishing issues. - 2005. – Vol. 6. – No. 3-23.– P. 575 – 598.
6. Voshchinina N.A. Chemical and toxicological study of derivatives of p-aminobenzoic acid (anesthetin, novocaine, novocainamide) : abstract of the dissertation of the Candidate of Pharmaceutical Sciences. Kursk : Kursk. med. un-T., 2000. – 20 p.
7. Rybin, E.V. The effect of dimexide on the body of horses / E.V. Rybin. – Text: electronic// http://www.rusnauka.com/28_OINXXI_2010/Veterenaria/72596.doc.htm
8. Evstigneeva, V.P. Chemical and toxicological analysis for a group of substances isolated by extraction and sorption. Narcotic and other intoxicating drugs / V.P. Evstigneeva, I.V. Shkutina, T.A. Brezhnev.– Voronezh: Vor. gos. un-t, 2004. – 47 p.
9. Zolotov, Yu.A. Fundamentals of analytical chemistry. General questions. Separation methods / Yu.A. Zolotov. – Moscow: Higher School, 1999. – 351 p.
10. Extraction-chromatographic determination of local anesthetics in aqueous media / Ya.I. Korenman, T.V. Chibisova, P.T. Sukhanov, [et al.]// Analytics and control.- 2013. – Vol.17. – No. 4. – P. 465 – 471.
11. Sumina, E.G. Thin-layer chromatography. Theoretical foundations and practical application / E.G. Sumina, S.N. Shtykov, N.V. Tyurina. – Saratov: Publishing house of Saratov State University, 2006. – 112 p.
12. Hille, B. The pH – dependent rate of action of local anesthesia on the node of Ranvier / B. Hille // J. General Physiol. – 1977. – Vol. 69.– No. 4. – P. 475 – 496. 13 Schmidt. M. A convenient TLC method for the identification of local anesthesia / M. Schmidt, F. Bracher // Pharmazie. – 2006. – Vol. 61. – No. 1. – P. 15-17.
13. Schmidt. M. A convenient TLC method for the identification of local anesthetics / M. Schmidt, F. Bracher // Pharmazie. – 2006. – Vol. 61. – No. 1. – P. 15 – 17.
14. Isolation, extraction concentration and determination of caffeine in the study of blood plasma / Ya. And Korenman, V.K. Shormanov, N.Ya. Mokshina, [et al.] // Court.-medical examination. - 2012. – No. 2. – P. 32-35.
15. Makarichev Yu.A. Methods of experiment planning and data processing / Yu.A. Makarichev, Yu.N. Ivannikov. – Samara: Samara State Technical University. un-t, 2016. – 131 p.
16. Gumerov, A.M. Mathematical modeling of chemical-technological processes / A.M. Gumerov. – St. Petersburg: Lan, 2022. – 176 p.
17. Sorbfil Densitometer: User Manual. Sorbpolymer: Krasnodar, 2006.– 17 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, ORCID, Email)
Санникова Н.Ю.	к.х.н., доцент, https://0000-0002-5583-2563 , cnu@inbox.ru
Суханов П.Т.	д.х.н., профессор, https://0000-0002-2588-9286 , pavel.suhanov@mail.ru
Чибисова Т.В.	к.х.н., tatyachibiso@yandex.ru

AUTHORS INFORMATION

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, ORCID, Email)
Sannikova N.Yu.	PhD, Assistant professor, https://0000-0002-5583-2563 ,cnu@inbox.ru
Sukhanov P.T.	DSc, Professor, https://0000-0002-2588-9286 ,pavel.suhanov@mail.ru
Chibisova T.V.	PhD, tatyachibiso@yandex.ru

