ISSN 0136-5835
e-ISSN 2542-1409
DOI: 10.17277/issn.0136-5835

ВЕСТНИК Тамбовского государственного технического университета

TRANSACTIONS of the Tambov State Technical University

2020. Том 26. № 3.

Четырехъязычный научно-теоретический и прикладной журнал широкого профиля

Four-Language Scientific-Theoretical and Applied Multidisciplinary Journal

Основан в 1995 году

Выходит 4 раза в год

http://vestnik.tstu.ru

Россия Тамбов
Издательство ТГТУ

Редакционная коллегия

Алымов Михаил Иванович, д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РАН, Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мержанова РАН

Абоносимов Олег Аркадьевич, д-р техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Абрамов Геннадий Владимирович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

Бузник Вячеслав Михайлович, д-р хим. наук, профессор, акад. РАН, Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН

Гатапова Наталья Цибиковна, д-р техн. наук, профессор, главный редактор, ФГБОУ ВО «ТГТУ», +7 4752 63 72 39; эл. почта: gatapova.nc@mail.tstu.ru

Дворецкий Станислав Иванович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Дивин Александр Георгиевич, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Дмитриевский Борис Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Ивлиев Андрей Дмитриевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», Екатеринбург

Илясов Леонид Владимирович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Квятковская Ирина Юрьевна, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»

Князева Лариса Геннадьевна, д-р хим. наук, доцент, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Тамбов

Краснянский Михаил Николаевич, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Куликов Геннадий Михайлович, д-р физ.-мат. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Лазарев Сергей Иванович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Литовка Юрий Владимирович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Матвейкин Валерий Григорьевич, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Мищенко Сергей Владимирович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Муджумдар Арун С., PhD, профессор, Университет Мак-Гилл, Монреаль, Канада

Муромцев Дмитрий Юрьевич, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Перре Патрик, PhD, профессор, Национальная школа инженерии сельского хозяйства, вод и лесов, Нанси, Франция

Пономарев Сергей Васильевич, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Сафаров Джавид, Dr.-Ing, Ростокский университет, Германия

Столин Александр Моисеевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мержанова РАН

Тихомиров Сергей Германович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

Тсотсас Евангелос, PhD, профессор, Университет Отто-фон-Герике, Магдебург, Германия

Цыганкова Людмила Евгеньевна, д-р хим. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина»

АДРЕС: Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, ТГТУ. Редакция журнала «Вестник ТГТУ». Главному редактору. Эл. почта: kvipri@ce.tstu.ru

Редакторы иностранных текстов: Н. А. Гунина, В. С. Григорьева, Н. Ю. Бородулина.
Редакторы: И. М. Курносова, О. В. Мочалина.
Компьютерная верстка: О. В. Мочалина, С. Ю. Прохорская.

Подписано в печать 21.10.2020 г. Дата выхода в свет 27.10.2020 г.
Формат 70×108/16. Усл. печ. л. 14,18; уч.-изд. л. 16,20. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ 033.
Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО «ТГТУ».
Россия, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112А. Тел. (4752) 63 07 46

ISSN 0136-5835
e-ISSN 2542-1409

Знак информационной продукции 16+

© ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2020
© Коллектив авторов, 2020

EDITORIAL BOARD

Mikhail Alymov, Dr. Tech. Sci., Prof., Corresponding Member RAS, Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of RAS

Oleg Абоносимов, Dr. Tech. Sci., Associate Professor, Tambov State Technical University

Gennady Abramov, Dr. Tech. Sci., Prof., Voronezh State University

Vyacheslav Buznik, Dr. Chem. Sci., Prof., Academician RAS, Baykov Institute of Metallurgy and Material Science RAS

Nataliya Gatapova, Editor-in-Chief, Tambov State Technical University, +7 4752 63 72 39; e-mail: gatapova.nc@mail.tstu.ru

Stanislav Dvoretsky, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Aleksander Divin, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Boris Dmitirievsky, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Andrey Ivliev, Dr. Phys.-Math. Sci., Prof., Russian State Professional Pedagogical University, Yekaterinburg

Leonid Ilyasov, Dr. Tech. Sci., Prof., Tver State Technical University

Irina Kvyatkovskaya, Dr. Tech. Sci., Prof., Astrakhan State Technical University

Larisa Knyazeva, Dr. Chem. Sci., Associate Professor, All-Russian Scientific Research Institute for the Use of Machinery and Oil Products in Agriculture, Tambov

Mikhail Krasnyanskiy, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Gennady Kulikov, Dr. Phys.-Math. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Sergey Lazarev, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Yuri Litovka, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Valery Matveykin, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Sergey Mishchenko., Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Mujumdar Arun S., PhD, McGill University Montreal, Canada

Dmitry Muromtsev, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Perré Patrick, PhD, National School of Rural Engineering, Water and Forests, Nancy, France

Sergey Ponomarev, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Javid Safarov, Dr.-Ing., University of Rostock, Germany

Aleksander Stolin, Dr. Phys.-Math. Sci., Prof., Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of RAS

Sergey Tikhomirov, Dr. Tech. Sci., Prof., Voronezh State University of Engineering Technologies

Evangelos Tsotsas, PhD, Otto-von-Guericke University, Magdeburg, Germany

Lyudmila Tsygankova, Dr. Chem. Sci., Prof., Derzhavin Tambov State University

ADDRESS: Scientific Editor of Transactions TSTU. 106, Sovetskaya Street, Tambov State Technical University, Tambov, 392000, Russia. E-mail: kvipri@ce.tstu.ru

Учредители: ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Издатель: ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»
Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106; e-mail: tstu@admin.tstu.ru

Средство массовой информации зарегистрировано
Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия
Зарегистрировано в Комитете Российской Федерации по печати.
Свидетельство о регистрации СМИ № 015098 от 19.07.1996

Журнал «Вестник Тамбовского государственного технического университета»
входит в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК,
в международную реферативную базу Chemical Abstracts

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» – 20498

СОДЕРЖАНИЕ

Автоматика. Информатика. Управление. Приборы 342

Акулинин Е. И., Голубятников О. О., Лабутин А. Н., Дворецкий Д. С., Дворецкий С. И. Моделирование и исследование динамики адсорбционного разделения синтез-газа и концентрирования водорода (*на английском языке*)..... 342

Юшин М. В., Сбитнев А. В. Проблемы интеграции на единой платформе технических средств и систем по обеспечению безопасности аэропортов и пути их решения. 357

Мокрозуб В. Г., Рачкова С. А., Вшивков Ф. И. Системный анализ поддержки принятия решений при проектировании сети общеобразовательных школ..... 363

Меренцов Н. А., Персидский А. В., Топилин М. В., Голованчиков А. Б. Система автоматизированной калибровки технологических параметров электроадсорбционных аппаратов селективной очистки газовых выбросов 371

Алгазин Е. И. Особенности описания линейных систем автоматики при различных структурах временных соотношений 388

Процессы и аппараты химических и других производств. Химия..... 393

Долгунин В. Н., Слепых А. В., Пронин В. А. Кинетические закономерности биоконверсии целлюлозосодержащего сырья с использованием культуры гриба *Trichoderma viride* 393

Марчук Е. А., Киреева А. В., Калинин Я. В. Математическое моделирование молекулярных соединений производных адамантана 402

Кошелева М. К., Дорняк О. Р., Цинцадзе М. З. Ресурсосберегающий процесс экстрагирования технологических загрязнений из волокнистого материала (*на английском языке*) 411

Балабанова М. Ю., Панов С. Ю., Хвостов А. А. Моделирование процесса химико-термической переработки целлюлозосодержащих материалов..... 421

Орлова Н. В., Александров Е. Б., Щербакова А. М., Орлов А. Ю. Методика расчета кристаллизатора периодического действия 431

Математика. Физика..... 437

Нахман А. Д. Методы полиномизации функций и их приложения..... 437

Машиностроение. Металлообработка 450

Божко Г. В., Продан В. Д., Фокина М. С., Воробьева Н. И. Анализ условий допустимой утечки из разъемных соединений технологического оборудования на основе Российских и зарубежных стандартов..... 450

Нечаев В. В. Методы поддержания и обеспечения работоспособного состояния автомобильной техники 459

Материаловедение. Нанотехнологии..... 472

Немтинов В. А., Матрохин М. А., Немтинова Ю. В., Крылов А. В. Усовершенствование конструкции установки гальванического цинкования мелких деталей черных металлов в насыпном виде 472

Николюкин А. Н., Ярцев В. П., Мамонтов С. А., Коломникова И. И., Печников А. С., Никитин Н. О. Аналитическое исследование величины сцепления цементного геля между арматурой и бетоном 483

Наши новые профессора, доктора и кандидаты наук..... 496

CONTENTS

Automation. InformationTechnology. Control. Instruments 342

Akulinin E. I., Golubyatnikov O. O., Labutin A. N., Dvoretsky D. S., Dvoretsky S. I. Modeling and Analysis of Dynamics of Pressure Swing Adsorption Process for Synthesis Gas Separation and Hydrogen Production (*in English*) 342

Yushin M. V., Sbitnev A. V. Problems of Integrating Airport Security Tools and Systems on a Single Platform and their Solutions 357

Mokrozub V. G., Rachkova S. A., Vshivkov F. I. System Analysis of Decision Support in the Design of a Secondary School Network 363

Merentsov N. A., Persidskiy A. V., Topilin M. V., Golovanchikov A. B. The Automated Calibration System for Process Parameters of Electric Adsorption Devices for Selective Purification of Gas Emissions 371

Algazin E. I. Features of the Description of Linear Automation Systems with Different Time Structures 388

Chemical and Related Engineering. Chemistry 393

Dolgunin V. N., Slepykh A. V., Pronin V. A. Kinetic Regularities of Bioconversion of Cellulose-Containing Raw Materials Using a Culture of the Fungus *Trichoderma Viride* 393

Marchuk E. A., Kireeva A. V., Kalinin Ya. V. Mathematical Modeling of Molecular Compounds of Adamantane Derivatives 402

Kosheleva M. K., Dornyak O. R., Tsintsadze M. Z. A Resource-Saving Process of Extracting Industrial Contaminats from Fibrous Material (*in English*) 411

Balabanova M. Yu., Panov S. Yu., Khvostov A. A. Modeling the Process of Chemical-Thermal Processing of Cellulose-Containing Materials 421

Orlova N. V., Aleksandrov E. B., Shcherbakova A. M., Orlov A. Yu. A Method for Calculating a Batch Crystallizer 431

Mathematics. Physics 437

Nakhman A. D. Function Polynomization Methods and their Applications 437

Mechanical Engineering. Metal Treatment 450

Bozhko G. V., Prodan V. D., Fokina M. S., Vorobyeva N. I. The Analysis of the Conditions of Permissible Leakage from Detachable Joints of Process Equipment Based on Russian and Foreign Standards 450

Nechaev V. V. Methods for Maintaining and Ensuring the Working Condition of Automotive Equipment 459

Material Science. Nanotechnology 472

Nemtinov V. A., Matrokhin M. A., Nemtinova Yu. V., Krylov A. V. Improving the Design of the Device for Galvanic Coating of Small Parts of Ferrous Metals in Bulk 472

Nikolyukin A. N., Yartsev V. P., Mamontov S. A., Kolomnikova I. I., Pechnikov A. S., Nikitin N. O. The Analytical Study of the Value of Adhesion of Cement Gel between Reinforcement and Concrete 483

New Professors, Doctors and Candidates of Sciences 496

УДК 661.935, 519.633.2
DOI: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.342-356

MODELING AND ANALYSIS OF DYNAMICS OF PRESSURE SWING ADSORPTION PROCESS FOR SYNTHESIS GAS SEPARATION AND HYDROGEN PRODUCTION

E. I. Akulinin[1], O. O. Golubyatnikov[1], A. N. Labutin[2], D. S. Dvoretsky[1], S. I. Dvoretsky[1]

Department of Technologies and Equipment for Food and Chemical Industries, topt@topt.tstu.ru; Tambov State Technical University (1), Tambov, Russia; Department of Technical Cybernetics and Automation, lan@isuct.ru; Ivanovo State University of Chemistry and Technology (2), Ivanovo, Russia

Keywords: pressure swing adsorption; zeolite adsorbent; synthesis gas; separation; hydrogen; kinetics; adsorption isotherm; heat and mass transfer; mathematical modeling; simulation.

Abstract: On the basis of the Dubinin theory of micropore volume filling, a mathematical model of dynamics of pressure swing adsorption processes for synthesis gas separation has been developed. The model takes into consideration the influence of the processes of mass and heat transfer in gas and solid phases on the kinetics of diffusion transfer of adsorbate (carbon dioxide, carbon monoxide, hydrogen) in the adsorbent layer and accounts for all devices included in the process diagram (adsorber, compressor, vacuum pump, valves, throttle, receiver). Numerical studies of the process of separation of synthesis gas and concentration of hydrogen in a four-adsorber unit with granulated zeolite adsorbent 13X were carried out by methods of mathematical modeling: the influence of disturbing influences (composition and temperature of the initial hydrogen-containing gas mixture), regime parameters (cycle duration, pressure at the compressor outlet, pressure at the vacuum pump inlet, backflow coefficient) and design parameters (length of the adsorbent bulk layer and inner diameter of the adsorber) on the purity of the product hydrogen, its recovery rate and productivity of the unit were studied. The most dangerous disturbances and the most effective regime parameters of pressure swing adsorption process of synthesis gas separation were determined. It is established that the increase of temperature from 298 to 323 K and decrease of hydrogen concentration from 68 to 48 % (vol.) in initial gas mixture result in ~10 % lower efficiency of the unit due to the decrease of product hydrogen recovery rate. Practical recommendations on effective choice of operation regimes of an adsorption unit to ensure the achievement of required purity of product hydrogen at the level of 99.99 % (vol.), regardless of the impact of disturbances are formulated.

Nomenclature

a_k – sorption value of the primary adsorption layer, mole/m^3;
a^* – sorption value sorption value in equilibrium with the current concentration of adsorbate on the external granule surface in the flow, mole/m^3;
B – a parameter identifying the predominant size of adsorbent micropores, 1/K^2;
c_k – molar concentration of k-th component in gas phase, mole/m^3;
c_{pg} – specific heat capacity of the gas mixture, J/(mole·K);
D_g – effective longitudinal dispersion coefficient in the gas phase, m^2/s;
d_p – diameter of adsorbent granules, m;
n_k – index of power of the Dubinin equation;
h_k – sorption heat of k-th component, J/mole;
M_g – molar mass of gas phase, kg/mole;
S_{sp} – specific surface ration of adsorbent granules, m^2/m^3;
c_{pa} – specific heat capacity of the adsorbent, J/(kg·K);
$P_{s,k}$ – saturation pressure, atm;
$P_{m,k}$ – partial pressure, atm;
T_g – temperature of the gas phase, K;
T_a – temperature in the adsorbent, K;
W_0 – limiting adsorption volume, cm^3/g;
x – spatial coordinate of the length (height) of the adsorbent layer, m;
α – heat transfer coefficient from the surface of adsorbent granules to the gas mixture flow, referred to the phase interface unit, Wt/(K·m^2);
β_k – a kinetic coefficient of mass transfer of k-th component, 1/s;
υ_k^* – molar volume of k-th component, cm^3/mole;
λ_g – gas phase heat transfer coefficient, Wt/(m·K);
λ_a – adsorbent heat transfer coefficient, Wt/(m·K);
ε – adsorbent porosity coefficient, m^3/m^3;
v_g – gas flow velocity;
ρ_a – adsorbent density, kg/m^3;
ρ_g – molar density of the gas mixture, mole/m^3;
σ_k – affinity coefficient of k-th component to standard gas;
μ_g – dynamic viscosity of the gas phase, Pa·s;
ς – adsorbent granular sphericity factor;
τ – time, s

Introduction

Processes of pressure-swing adsorption (**PSA**) are widely used in industry for purification and separation of gas mixtures, concentration of various gases (hydrogen, oxygen, nitrogen, carbon dioxide, etc.). One of the urgent problems is the extraction of hydrogen from hydrogen-containing process flows (hydrocarbon conversion and oxidation gases, petroleum gases, synthesis gas, etc.) and its concentration up to 99.99 % (vol.). Typical substances accompanying hydrogen are carbon oxide and dioxide, nitrogen, methane, which have higher adsorption selectivity values [1]. Separation of synthesis gas and concentration of hydrogen is carried out in multi-adsorber PSA units using microporous adsorbents (granular active coals and zeolites of 5A, 13X with the highest capacity and selectivity for CO_2 and CO are most often used) [2 – 8].

In the process of operation of the PSA units there is a problem of ensuring the required technological indicators on the purity of the product hydrogen, its recovery rate and the unit productivity due to the influence of various disturbing influences. The sources of these are the instability of the composition and temperature of the initial gas mixture (synthesis gas), changes in the characteristics of the adsorbent during the

operation of the PSA unit, variations in the amount of the product flow bleed [9 – 12]. Thus, for example, synthesis gas obtained by Lurga method can contain approximately 15 – 18 % of CO, 38 – 40 % of H_2, 9 – 11 % of CH_4, 30 – 32 % of CO_2; the temperature of the initial gas mixture can vary from 20 to 50 ºC.

Mathematical modelling is a method recommended to study the effect of disturbing influences (composition and temperature of the initial hydrogen-containing gas mixture), regime parameters (cycle duration, pressure at the compressor outlet, pressure at the vacuum pump inlet, backflow coefficient) and design parameters (internal diameter of the adsorber, length and diameter of particles of the adsorbent bulk layer) on the recovery rate (concentration), purity of the concentrated hydrogen and productivity of the PSA unit [9, 10, 13 – 17].

In particular, in [18] Lopes et al. discuss mathematical modelling of a vacuum-pressure single adsorber PSA unit using granulated active coal as an adsorbent. The values of regime parameters (cycle duration and pressure at the balancing stage) providing hydrogen purity at the unit outlet more than 99.99 %, degree of its recovery 75 % and specific capacity of 160 mole H_2 per kg of adsorbent per day, were established.

In [19] mathematical modelling of hydrogen recovery process by steam methane reforming using PSA method was performed. It was established that pressure at adsorption stage, backflow coefficient and duration of adsorption stage influence the productivity of the unit, enabling to concentrate hydrogen with purity of more than 99.95 % and 80 % recovery rate. It is shown that increasing the concentration of hydrogen-related components in the initial gas mixture, in particular methane, leads to a decrease in purity of hydrogen at the outlet of the unit.

Tao et al. [8] have performed numerical studies of the pressure swing adsorption process of hydrogen concentration from five-component gas mixture carried out in a single-adsorber vacuum-pressure PSA unit. It was established that increasing the duration of the adsorption stage and the backflow coefficient leads to an increase in the purity of hydrogen and a decrease in the rate of its recovery.

The procedure of building a mathematical model of dynamics of pressure swing adsorption processes includes the following stages: 1) determining the structure of the model taking into account the effect of the transfer processes in all devices included in the process chart of the PSA unit (compressor, vacuum pump, valves, adsorbers, throttle, receiver, etc.); 2) obtaining experimental data on the PSA process under study, including the equilibrium conditions of adsorption and desorption processes of gas mixtures; 3) parametric synthesis of the model; 4) analysis and ensuring the adequacy of the mathematical model.

The aim of this research is to develop a mathematical model of dynamics of pressure swing adsorption process of synthesis gas separation and hydrogen concentration (using the theory of micropore volume filling of the Academician M.M. Dubinin) taking into account the influence of the processes of mass and heat transfer in the gas and solid phases on the kinetics of diffusion transport of adsorbate (H_2, CO_2, CO) in the adsorbent layer and the linkages of all devices included in the PSA unit. Also, numerical research of influence of regime and design parameters of the four-adsorber PSA unit for hydrogen concentration on purity of the product hydrogen, rate of its recovery and productivity of the unit within the specified range of changes of disturbing influences (composition and temperature of the initial hydrogen-containing mixture) will be conducted.

Mathematical description of dynamics of synthesis gas separation and hydrogen concentration process

The process of separation of synthesis gas and concentration of hydrogen up to 99.99 % (vol.) by the PSA method is carried out in a four-adsorber unit with granulated 13X adsorbent [20].

The pressure in the adsorbers is built up with the use of a compressor by opening controlled valves, through which the gas mixture to be separated is fed to the adsorbent layer. One complete unit operation cycle includes three stages: 1) adsorption mainly of CO_2, CO; in the adsorber the pressure is built up to the operating value, the product hydrogen is removed from the adsorbers and sent through the receiver to the consumer; 2) adsorption mainly of CO_2, CO (the adsorbent layer is regenerated by counter-current flow of the blow-off (hydrogen-enriched) gas mixture;) adsorption pressure reduction to atmospheric pressure; 3) pressure equalization in adsorbers (using the residual pressure in one adsorber after the adsorption stage to build up the pressure in another adsorber).

The following mass and heat exchange processes take place in the PSA unit during adsorption-desorption of H_2, CO_2 and CO with 13X zeolite adsorbent: a) diffusion of H_2, CO_2 and CO in the gas mixture flow; b) mass transfer of H_2, CO_2, CO and heat exchange between the gas phase and the adsorbent; c) adsorption of H_2, CO_2, CO on the surface and in micropores of zeolite adsorbent granules, with the evolution of heat; d) desorption of H_2, CO_2, CO from micropores and from the granule surface, with heat absorption.

In the mathematical description of the PSA process of synthesis gas separation and hydrogen concentration, the following assumptions were made: 1) the initial gas mixture (synthesis gas) is a three-component one (containing: 1 – H_2 with concentration of 48 – 68 % (vol.), 2 – CO_2 with concentration of 27 – 47 % (vol.), 3 – CO with concentration of 5 % (vol.)) and is considered as an ideal gas, which is feasible at pressures in the adsorber up to 200×10^5 Pa [21, 22]; 2) diffusion of H_2, CO_2, CO and heat distribution in the gas flow and granulated adsorbent is carried out in the longitudinal direction relative to the flow of the gas mixture in the adsorbent (by the height of the adsorbent layer) [18, 23 – 31]; 3) the process of adsorption-desorption of H_2, CO_2, CO by the adsorbent is carried out in the external diffusion area and is determined by the external mass transfer coefficient, the velocity of the gas mixture in the adsorbent layer, as well as the equilibrium relations of concentrations of H_2, CO_2 and CO in the phases [18, 24 – 26, 28, 30]; 4) granulated 13X zeolite with granule diameter 1.5 mm is used as adsorbent [2, 3, 32]; 5) adsorption equilibrium is described by Dubinin–Radushkevich equation [33]; 6) desorption branches of adsorption isotherms of H_2, CO_2, CO on 13X zeolite coincide with adsorption ones [1]; 7) gas temperature in receiver is equal to gas temperature at adsorption outlet, radiation heat loss is negligible.

In accordance with the accepted assumptions, the mathematical description of the processes occurring in the adsorber of the PSA unit during the separation of synthesis gas and hydrogen concentration includes the following equations:

1. Equations of component-wise material balance (k = 1 – H_2, 2 – CO_2, 3 – CO) in the gas phase flow by the adsorbent layer height [1]

$$\frac{\partial c_k(x,\tau)}{\partial\tau}+\frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon}\frac{\partial a_k(x,\tau)}{\partial\tau}+v_{\mathrm{g}}(x,\tau)\frac{\partial(c_k(x,\tau))}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left(D_{\mathrm{g}}\frac{\partial(c_k(x,\tau)}{\partial x}\right), \qquad (1)$$

where $\varepsilon = 0.4$.

2. Sorption kinetics equation (Glueckauf equation) in a primary adsorption layer during internal diffusion transfer [33]

$$\frac{\partial a_k(x,\tau)}{\partial t} = \beta_k (a_k^* - a_k(x,\tau)), \tag{2}$$

where a^* is determined by the sorption isotherm equation of Dubinin–Radushkevich [33]

$$a_k^* = \rho_a \frac{W_0}{\upsilon_k^*} \exp\left[-\left(\sqrt{B} \frac{T_g(x,\tau)}{\sigma_k} \lg\left(\frac{P_{s,k}}{P_{m,k}} \right) \right)^{n_k} \right], \tag{3}$$

where $\rho_a = 2140$; $W_0 = 0.262$; $B = 2.2\times10^{-6}$; $\sigma_1 = 0.15$, $\sigma_2 = 2.31$, $\sigma_3 = 0.84$; $n_1 = 1$, $n_2 = 2$, $n_3 = 2$.

3. The equation describing the heat distribution in the gas mixture flow by the height of the adsorbent

$$c_{pg}\rho_g \frac{\partial T_g(x,\tau)}{\partial \tau} + c_{pg}\rho_g v_g \frac{\partial T_g(x,\tau)}{\partial x} - \frac{\alpha}{\varepsilon} S_{sp}\left[T_a(x,\tau) - T_g(x,\tau)\right] = \lambda_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial x^2}, \tag{4}$$

where $c_{pg} = 9971.44$; $S_{sp} = 4000$; $\lambda_g = 0.129$.

4. The equation of heat diffusion in the adsorbent

$$c_{pa}\rho_a \frac{\partial T_a(x,\tau)}{\partial \tau} + \alpha S_{sp}\left[T_a(x,\tau) - T_g(x,\tau)\right] - \sum_k h_k \frac{\partial a_k(x,\tau)}{\partial \tau} = \lambda_a \frac{\partial^2 T_a(x,\tau)}{\partial x^2}, \tag{5}$$

where $c_{pa} = 830$; $\rho_a = 2140$; $\lambda_a = 0.139$.

5. Continuity and Ergun equations linking pressure and gas mixture velocity variations in adsorbent height [34]:

$$\sum_k c_k \frac{\partial v_g(x,\tau)}{\partial x} - v_g\left(\frac{\partial \sum_k c_k}{\partial x} \right) = 0, \tag{6}$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\left(\frac{150(1-\varepsilon)^2}{(d_p\varsigma)^2 \varepsilon} \mu_g v_g + 1.75 M_g \rho_g \frac{(1-\varepsilon)}{d_p \varsigma \varepsilon^3} v_g^2 \right), \tag{7}$$

where $\mu_g = 1.069\times10^{-5}$; $\varsigma = 1$.

Initial and boundary conditions for equations (1) – (7), formulas for calculation of parameters of mathematical model and adsorption equilibrium at separation of multicomponent gas mixture using Dubinin–Radushkevich equation, equation of pressure change in adsorbers and receiver of unit, flow rate of gas mixture passing through regulating inlet, outlet valves and throttle are presented in [35] and are not given here.

Thus, the mathematical description of the dynamics of the pressure swing adsorption process of synthesis gas separation and hydrogen concentration is a system of differential and finite equations, which is solved using the method of straight lines in the MATLAB software environment [36]. The accuracy analysis of the mathematical model was performed using the actual standard error between the model calculated and the experimental values of hydrogen purity at the adsorber outlet. The actual standard error was 0.15 % (vol.), which makes it possible to use the mathematical model for investigation of pressure swing adsorption processes and PSA units for synthesis gas separation and hydrogen concentration [9, 20].

When researching the effect of disturbing influences, regime and design parameters of the PSA unit on the performance indicators of the cyclic process

of hydrogen adsorption concentration the following were used: 1) as regime parameters of the PSA unit – the duration τ_{ads} of adsorption stage, which is equal to the stage of desorption τ_{des} and equalization τ_{eq} in terms of time period (in this case, the duration τ_c of the "adsorption-desorption" cycle is equal to $\tau_c = \tau_{ads} + \tau_{des} + 2\tau_{eq}$), the pressure P^{in} at the compressor outlet, the pressure P_{des}^{in} at the inlet of the vacuum pump; backflow coefficient θ, which determines the proportion of the product flow selected for adsorption regeneration; 2) as design parameters of the unit - length (height) L of the adsorbent bulk layer, internal diameter D of the adsorbent, diameter of particles d_p of the adsorbent bulk layer; 3) as disturbances - composition y^{in} and temperature T_g^{in} of the initial hydrogen-containing gas mixture supplied to the adsorbers for separation. Input data for computational experiments are presented in Table 1.

Based on the analysis of graphs of dependences of product hydrogen purity y_1^{out}, its recovery rate η and productivity of the unit G^{out} from the duration of adsorption stage τ_{ads} (at a nominal regime of PSA unit operation), duration of adsorption stage τ_{ads} can be set to 120 s (and, accordingly, cycle duration $\tau_c = 480$ s), at which hydrogen purity is reached at the level of $y_1^{out} = 99.99$ % (vol.) and maximum recovery rate is provided $\eta = 55$ % (Fig. 1).

An increase in the temperature of the initial gas mixture from 298 to 323 K leads to the need to reduce the duration of the adsorption stage τ_{ads} from 120 to 40 s due to a decrease in the equilibrium concentrations of carbon dioxide and carbon monoxide in the adsorbent (Fig. 2).

When the hydrogen content decreases from 68 to 48 % (vol.) and the carbon dioxide content in the initial gas mixture increases from 27 to 47 % (vol.), the adsorption capacity is exhausted faster, and the required hydrogen purity value at 99.99 % (vol.) is not reached (Fig. 3). Thus productivity of installation decreases on ~25 %. Calculations show that the increase of pressure at the compressor outlet from 17.5×10^5 to 23.5×10^5 Pa allows to increase productivity by ~25 %, but the rate of hydrogen recovery is reduced relative to the nominal regime from 55 % to 50 %.

Table 1

Source data for computational experiment

Variables	Variation range	Nominal value
Duration of the adsorption stage τ_{ads}, s	10…180	40
Pressure at the compressor outlet P^{in}, $\times 10^5$ Pa	5…30	17.5
Pressure at the inlet of the vacuum pump P_{des}^{in}, $\times 10^5$ Pa	0.5…1	0.75
Backflow coefficient θ, r.u.	1.25…15	5.83
Concentration of components in the initial mixture y^{in}		
H_2	48…68	68
CO_2	27…47	47
CO	5	5
Temperature of the initial mixture T_g^{in}, K	293…323	298
Ratio of adsorber length to its diameter L/D	4…8	6

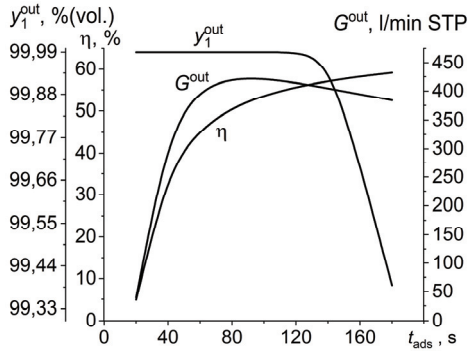


Fig. 1. Dependence of the purity of the product hydrogen y_1^{out}, its recovery rate η and the productivity of the unit G^{out} on the duration of the adsorption stage τ_{ads} at the nominal operating regime of the unit

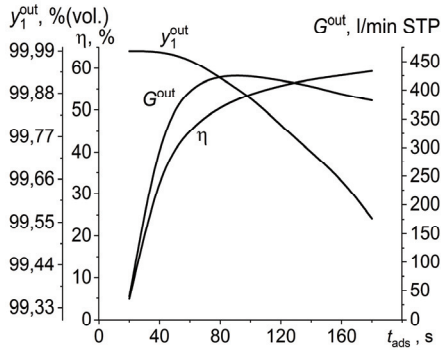


Fig. 2. Dependence of the purity of the product hydrogen y_1^{out}, its recovery rate η and the productivity of the unit G^{out} on the duration of the adsorption stage τ_{ads} at T_g^{in} = 323 K

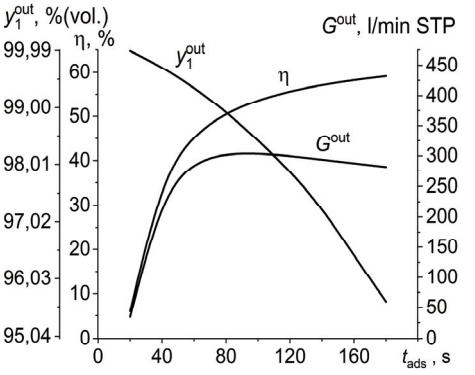


Fig. 3. Dependence of the purity of the product hydrogen y_1^{out}, its recovery rate η and the productivity of the unit G^{out} on the duration of the adsorption stage τ_{ads} at y_1^{in} = 48 % (vol.)

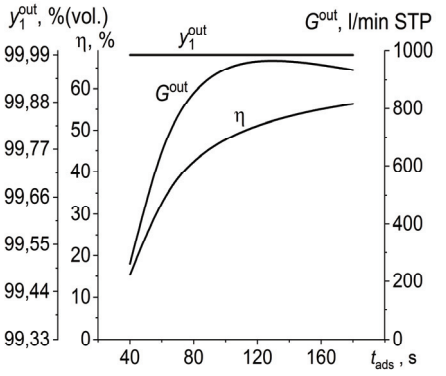


Fig. 4. Dependence of the purity of the product hydrogen y_1^{out}, its recovery rate η and the productivity of the unit G^{out} on the duration of the adsorption stage τ_{ads} at $P^{in} = 30\times10^5$ Pa

The increase in pressure at the inlet to the unit from 17.5×10^5 to 30×10^5 Pa leads to a decrease in the hydrogen recovery rate by ~10 % and an increase in productivity by 2.5 times (Fig. 4) relative to the nominal regime (Fig. 1). This fact is explained by an increase in the equilibrium concentration of recoverable components in the adsorbent when pressure P^{in} increases from 17.5×10^5 to 30×10^5 Pa. Decrease of pressure at an unit inlet from 17.5×10^5 to 5×10^5 Pa, on the contrary, leads to the increase of the hydrogen recovery rate by ~2 %, however productivity of the unit decreases by eight times (not shown in figures).

The increase in pressure at the vacuum pump inlet from 0.75×10^5 to 1×10^5 Pa leads to a reduction of adsorption stage duration from 120 to 50 s, the rate of hydrogen recovery from 55 to 48 % (not presented in figures). Decrease of pressure at vacuum pump outlet from 0.75×10^5 to 0.5×10^5 Pa increases the duration of adsorption stage

from 120 to 150 s, at which the required purity of product hydrogen y_1^{out} = 99.99 % (vol.) is provided. The rate of hydrogen recovery decreases from 55 to 52 % due to an increase in the share of the flow taken for adsorbent regeneration. Calculations show that in order to increase the recovery rate up to 55 % (while maintaining hydrogen purity of 99.99 % (vol.)) in this regime it is necessary to reduce the backflow coefficient by ~5 % relative to its nominal value.

An increase in the length of the adsorbent bulk layer from 0.9 m to 1.2 m leads to a 5 % decrease in the recovery rate of hydrogen due to an increase in the pressure drop in the adsorbent layer (not shown in the figures). Decrease of adsorber length from 0.9 m to 0.6 m, on the contrary, results in the increase of hydrogen recovery rate on the average by 2 %, but the required level of hydrogen purity of 99.99 % (vol.) is not reached because of rapid depletion of adsorption capacity of adsorbent.

Conclusion

Using current methods of system analysis, mathematical modelling and computational experiments, new results have been obtained for the theory and practice of designing pressure swing adsorption processes of multi-component gas mixtures separation. The following parameters have been identified: 1) composition and temperature of the initial hydrogen-containing mixture have the most dangerous disturbing effects on the PSA process of synthesis gas separation and hydrogen concentration; 2) the most effective regime parameters are duration of the adsorption stage, pressure at the compressor outlet, pressure at the vacuum pump inlet and backflow coefficient. It is established that at increase of temperature from 298 to 323 K and decrease of hydrogen concentration from 68 to 48 % (vol.) in initial gas mixture, it is most expedient to increase pressure at compressor outlet by 1.7 times and lower backflow coefficient by ~5 % against their nominal values, but the efficiency of the unit will decrease by ~10 % because of the lower hydrogen recovery rate. It is also established that increase in length of adsorbent bulk layer from 0.9 m to 1.2 m causes increase in pressure drop in adsorbent layer and decrease in hydrogen recovery rate on the average by 5 %. Decrease in length of adsorbent bulk layer from 0.9 m to 0.6 leads to rapid depletion of adsorbent capacity and as a result the required purity of hydrogen of 99.99 % (vol.) cannot be achieved.

The mathematical model of the pressure swing adsorption process of synthesis gas separation can be used to study the dynamics of PSA processes of gas mixture separation, to optimize and improve the efficiency of PSA units with cyclically varying pressure.

The results obtained in this work can be applied to the design of new automated processes and pressure swing adsorption units for separation and purification of hydrogen-containing gas mixtures.

The study was commissioned and carried out with financial support of the Grant from the President of Russia MK-1604.2020.8.

References

1. Ruthven D.M., Farooq S., Knaebel K.S. *Pressure swing adsorption*, New York, 1993, 189 p.

2. Kim H., Lee J., Lee S. [et. al.] Operating optimization and economic evaluation of multicomponent gas separation process using pressure swing adsorption and membrane process, *Korean Chem. Eng. Res.*, 2015, vol. 53(1), pp. 31-38, doi:10.9713/kcer.2015.53.1.31

3. Boukoulava F., Hasan M, Floudas C. Global optimization of general constrained grey-box models: new method and its application to constrained PDEs for pressure swing adsorption, *Journal of Global Optimization*, 2015, vol. 67 (1-2), pp. 3-42, doi:10.1007/s10898-015-0376-2

4. Nikolic D., Kikkindes E. Modelling and optimization of hybrid PSA/membrane separation processes, *Adsorption*, 2015, vol. 21 (4), pp. 283-305, doi:10.1007/s10450-015-9670-z

5. Dowling A., Vetukuri S., Biegler L. Large-scale optimization strategies for pressure swing adsorption cycle synthesis, *AlChE J.*, 2012, vol. 58 (12), pp. 3777-3791, doi:10.1002/aic.13928

6. Agarwal A., Biegler L., Zitney S. Superstructure-based optimal synthesis of pressure swing adsorption cycles for precombustion CO2 Capture, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2010, vol. 49 (11), pp. 5066-5079, doi:10.1021/ie900873j

7. Huang Q., Malekian A., Eic M. Optimization of PSA process for producing enriched hydrogen from plasma reactor gas, *Sep. Purif. Technol.*, 2008, vol. 62 (1), pp. 22-31, doi:10.1016/j.seppur.2007.12.017

8. Tao W., Ma S., Xiao J. [et. al.] Simulation and optimization for hydrogen purification performance of vacuum pressure swing adsorption, *Energy Procedia*, 2019, vol. 158, pp. 1917-1923, doi:10.1016/ j.egypro.2019.01.441

9. Khajuria H. *Model-based Design, Operation and Control of Pressure Swing Adsorption Systems*, Imperial College London, 2011, 203 p.

10. Agarwal A. *Advanced Strategies for Optimal Design and Operation of Pressure Swing Adsorption Processes*, Carnegie Mellon University, 2010, 216 p.

11. Han Z.-Y., Xing R., Zhang D.-H. [et. al.] Vacuum pressure swing adsorption system for N2/CH4 separation under uncertainty, *Chem. Eng. Res. Des.*, 2019, vol. 142, pp. 245-256, doi:10.1016/j.cherd.2018.12.017

12. Khajuria H., Pistikopoulos E.N. Optimization and control of pressure swing adsorption processes under uncertainty, *AlChE J.*, 2013, vol. 59 (1), pp. 120-131, doi:10.1002/aic.13783

13. Santos J.C. *Study of New Adsorbents and Operation Cycles for Medical PSA Units*, Universidade do Porto, 2005, 215 p.

14. Biegler L.T., Jiang L., Fox V.G. Recent advances in simulation and optimal design of pressure swing adsorption systems, *Separation and Purification Reviews*, 2004, vol. 33 (1), pp. 1-39, doi:10.1081/SPM-120039562

15. Ben-Mansour R., Habib M.A., Bamidele O.E. [et. al.] Carbon capture by physical adsorption: Materials, experimental investigations and numerical modeling and simulations – A review, *Applied Energy*, 2016, vol. 161, pp. 225-255, doi:10.1016/j.apenergy.2015.10.011

16. Shafeeyan M.S., Wan Daud W.M.A., Shamiri A. A review of mathematical modeling of fixed-bed columns for carbon dioxide adsorption, *Chem. Eng. Res. Des.*, 2014, vol. 92 (5), pp. 961-988, doi:10.1016/ j.cherd.2013.08.018

17. Akulinin E.I., Golubyatnikov O.O., Dvoretsky D.S. [et. al.] Numerical study of the dynamics of air separation process by pressure swing adsorption, *Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*, 2019, vol. 12 (4), pp. 95-103, doi:10.14529/mmp190407

18. Lopes F., Grande C., Rodrigues A. Activated carbon for hydrogen purification by pressure swing adsorption: Multicomponent breakthrough curves and PSA performance, *Chem. Eng. Sci.*, 2011, vol. 66 (3), pp. 303-317, doi:10.1016/j.ces.2010.10.034

19. Li H., Liao Z., Sun J. [et. al.] Modelling and simulation of two-bed PSA process for separating H_2 from methane steam reforming, *Chin. J. Chem. Eng.*, 2019, vol. 27 (8), pp. 1870-1878, doi:10.1016/ j.cjche.2018.11.022

20. Khajuria H., Pistikopoulos E. Dynamic modeling and explicit/multi-parametric MPC control of pressure swing adsorption systems, *Journal of Process Control*, 2011, vol. 21, pp. 151-163, doi:10.1016/ j.jprocont.2010.10.021

21. Ye F., Ma S., Tong L. [et. al.] Artificial neural network based optimization for hydrogen purification performance of pressure swing adsorption, *Int. J. Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44 (11), pp. 5334-5344, doi:10.1016/ j.ijhydene.2018.08.104

22. Reid R., Prausnitz J., Sherwood T. *The properties of gases and liquids. Third Edition*, McGraw-Hill, 1977, 707 p.

23. Ohs B., Lohaus J., Marten D. [et. al.] Optimized hollow fiber sorbents and pressure swing adsorption process for H-2 recovery, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2018, vol. 57 (14), pp. 5093-5105, doi:10.1021/acs.iecr.7b05368

24. Arora A., Bajaj I., Iyer S. [et. al.] Optimal synthesis of periodic sorption enhanced reaction processes with application to hydrogen production, *Comput. Chem. Eng.*, 2018, vol. 115, pp. 89-111, doi:10.1016/ j.compchemeng.2018.04.004

25. Akulinin E.I., Golubyatnikov O.O., Dvoretsky D.S. [et. al.] Optimizing pressure-swing adsorption processes and installations for gas mixture purification and separation, *Chemical Engineering Transactions*, 2019, vol. 74, pp. 883-888, doi: 10.3303/CET1974148

26. Yavary M., Ebrahim H.A, Falamaki C. The effect of number of pressure equalization steps on the performance of pressure swing adsorption process, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2015, vol. 87, pp. 35-44, doi:10.1016/j.cep.2014.11.003

27. Sanchez R., Riboldi L., Jakobsen H. Numerical modelling and simulation of hydrogen production via four different chemical reforming processes: process performance and energy requirements, *Can. J. Chem. Eng.*, 2017, vol. 95 (5), pp. 880-901, doi:10.1002/cjce.22758

28. Abdeljaoued A., Relvas F., Mendes A. [et. al.] Simulation and experimental results of a PSA process for production of hydrogen used in fuel cells, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018, vol. 6 (1), pp. 338-355, doi:10.1016/j.jece.2017.12.010

29. Tavan Y., Hosseini S.H., Olazar M. A note on an integrated process of methane steam reforming in junction with pressure-swing adsorption to produce pure hydrogen: Mathematical modeling, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2015, vol. 54 (51), pp. 12937-12947, doi:10.1021/acs.iecr.5b01477

30. Karagoz S., Tsotsis T., Manousiouthakis V. Multi-scale modeling and simulation of a novel membrane reactor (MR)/adsorptive reactor (AR) process, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2019, vol. 137, pp. 148-158, doi:10.1016/j.cep.2019.01.012

31. Akulinin E.I., Golubyatnikov O.O., Dvoretsky D.S. [et. al.] Numerical study of cyclic adsorption processes of air oxygen enrichment in dynamics, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, p. 012005, doi:10.1088/1742-6596/1278/1/012005

32. Delgado J., Agueda V., Uguina M. [et. al.] Adsorption and Diffusion of H_2, CO, CH_4, and CO_2 in BPL Activated Carbon and 13X Zeolite: Evaluation of Performance in Pressure Swing Adsorption Hydrogen Purification by Simulation, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2014, vol. 53 (40), pp. 15414-15426, doi:10.1021/ie403744u

33. Dubinin M.M. *Progress in surface and membrane science. Vol. 9*, New York: Academic Press, 1975, pp. 1-70.

34. Ergun S. Fluid flow through packed columns, *Chem. Eng. Progress*, 1952, vol. 48, pp. 89-94.

35. Akulinin E.I., Golubyatnikov O.O., Dvoretsky D.S. [et. al.] Optimization and analysis of pressure swing adsorption process for oxygen production from air under uncertainty, *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 2020, vol. 26 (1), pp. 89-104, doi:10.2298/CICEQ190414028A

36. Rice R.G., Do D.D. *Applied mathematics and modeling for chemical engineers*, 2 ed. Wiley, New Jersey, 2012, 396 p.

Моделирование и исследование динамики адсорбционного разделения синтез-газа и концентрирования водорода

Е. И. Акулинин[1], О. О. Голубятников[1], А. Н. Лабутин[2], Д. С. Дворецкий[1], С. И. Дворецкий[1]

Кафедра «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», topt@topt.tstu.ru;ФГБОУ ВО «ТГТУ» (1), г. Тамбов, Россия; кафедра «Технической кибернетики и автоматики», lan@isuct.ru; ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет» (2), г. Иваново, Россия

Ключевые слова: водород; изотерма адсорбции; кинетика; короткоцикловая безнагревная адсорбция; математическое моделирование; разделение; синтез-газ; тепло-массоперенос; цеолитовый адсорбент; численный анализ.

Аннотация: На основе теории объемного заполнения микропор академика М. М. Дубинина разработана математическая модель динамики циклических адсорбционных процессов при разделении синтез-газа с учетом влияния процессов массо- и теплопереноса в газовой и твердой фазах на кинетику диффузионного переноса адсорбтива (диоксида углерода, монооксида углерода, водорода) в слое адсорбента и с учетом всех устройств, входящих в технологическую схему процесса (адсорбер, компрессор, вакуум-насос, клапаны, дроссель, ресивер). Методом математического моделирования проведены численные исследования процесса разделения синтез-газа и концентрирования водорода, осуществляемого в четырехадсорберной установке с гранулированным цеолитовым адсорбентом NaX: исследовано влияние возмущающих воздействий (состава и температуры исходной водородсодержащей газовой смеси), режимных (длительности цикла, давления на выходе компрессора, давления на входе вакуум-насоса, коэффициента обратного потока) и конструктивных параметров (длины насыпного слоя адсорбента и внутреннего диаметра адсорбера) на чистоту продуктового водорода, степень его извлечения и производительность установки. Определены наиболее опасные возмущающие воздействия и наиболее эффективные режимные параметры циклического адсорбционного процесса разделения синтез-газа. Установлено, что повышение температуры от 298 до 323 К и снижение концентрации водорода от 68 до 48 об.% в исходной газовой смеси приводит к снижению эффективности работы установки на ~10 % за счет уменьшения степени извлечения продуктового водорода. Сформулированы практические рекомендации по эффективному выбору режимов работы адсорбционной установки, обеспечивающие достижение требуемой чистоты продуктового водорода на уровне 99.99 об.% при воздействии возмущений.

Список литературы

1. Ruthven, D. M. Pressure swing adsorption / D. M. Ruthven, S. Farooq, K. S. Knaebel. – New York, 1993. – 189 p.

2. Kim, H. Operating optimization and economic evaluation of multicomponent gas separation process using pressure swing adsorption and membrane process / H. Kim, J. Lee, S. Lee [et. al.] // Korean Chem. Eng. Res. – 2015. – Vol. 53 (1). – P. 31 – 38. doi:10.9713/kcer.2015.53.1.31

3. Boukoulava, F. Global optimization of general constrained grey-box models: new method and its application to constrained PDEs for pressure swing adsorption / F. Boukoulava, M. Hasan, C. Floudas // Journal of Global Optimization. – 2015. – Vol. 67 (1-2). – P. 3 – 42. doi:10.1007/s10898-015-0376-2

4. Nikolic, D. Modelling and optimization of hybrid PSA/membrane separation processes / D. Nikolic, E. Kikkindes // Adsorption. – 2015. – Vol. 21 (4). – P. 283 – 305. doi:10.1007/s10450-015-9670-z

5. Dowling, A. Large-scale optimization strategies for pressure swing adsorption cycle synthesis / A. Dowling, S. Vetukuri, L. Biegler // AlChE J. – 2012. – Vol. 58 (12). – P. 3777 – 3791. doi:10.1002/aic.13928

6. Agarwal, A. Superstructure-based optimal synthesis of pressure swing adsorption cycles for precombustion CO2 Capture / A. Agarwal, L. Biegler, S. Zitney // Ind. Eng. Chem. Res. – 2010. – Vol. 49 (11). – P. 5066 – 5079. doi: 10.1021/ie900873j

7. Huang, Q. Optimization of PSA process for producing enriched hydrogen from plasma reactor gas / Q. Huang, A. Malekian, M. Eic // Sep. Purif. Technol. – 2008. – Vol. 62 (1). – P. 22 – 31. doi:10.1016/j.seppur.2007.12.017

8. Tao, W. Simulation and optimization for hydrogen purification performance of vacuum pressure swing adsorption / W. Tao, S. Ma, J. Xiao [et. al.] // Energy Procedia. – 2019. – Vol. 158. – P. 1917 – 1923. doi:10.1016/ j.egypro.2019.01.441

9. Khajuria, H. Model-based Design, Operation and Control of Pressure Swing Adsorption Systems / H. Khajuria. – Imperial College London, 2011. – 203 p.

10. Agarwal, A. Advanced Strategies for Optimal Design and Operation of Pressure Swing Adsorption Processes / A. Agarwal. – Carnegie Mellon University, 2010. – 216 p.

11. Han, Z.-Y. Vacuum pressure swing adsorption system for N2/CH4 separation under uncertainty / Z.-Y. Han, R. Xing, D.-H. Zhang [et. al.] // Chem. Eng. Res. Des. – 2019. – Vol. 142. – P. 245 – 256. doi:10.1016/j.cherd.2018.12.017

12. Khajuria, H. Optimization and control of pressure swing adsorption processes under uncertainty / H. Khajuria, E. N. Pistikopoulos // AlChE J. – 2013. – Vol. 59 (1). – P. 120 – 131. doi:10.1002/aic.13783

13. Santos, J. C. Study of New Adsorbents and Operation Cycles for Medical PSA Units / J. C. Santos. – Universidade do Porto, 2005, 215 p.

14. Biegler, L. T. Recent advances in simulation and optimal design of pressure swing adsorption systems / L. T. Biegler, L. Jiang, V. G. Fox // Separation and Purification Reviews. – 2004. – Vol. 33 (1). – P. 1 – 39. doi:10.1081/SPM-120039562

15. Ben-Mansour, R. Carbon capture by physical adsorption: Materials, experimental investigations and numerical modeling and simulations - A review / R. Ben-Mansour, M. A. Habib, O. E. Bamidele [et. al.] // Applied Energy. – 2016. – Vol. 161. – P. 225 – 255. doi:10.1016/j.apenergy.2015.10.011

16. Shafeeyan, M. S. A review of mathematical modeling of fixed-bed columns for carbon dioxide adsorption / M. S. Shafeeyan, W. M. A. Wan Daud, A. Shamiri // Chem. Eng. Res. Des. – 2014. – Vol. 92 (5). – P. 961 – 988. doi:10.1016/ j.cherd.2013.08.018

17. Akulinin, E. I. Numerical study of the dynamics of air separation process by pressure swing adsorption / E. I. Akulinin, O. O. Golubyatnikov, D. S. Dvoretsky [et. al.] // Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software. – 2019. – Vol. 12 (4). – P. 95 – 103. doi:10.14529/mmp190407

18. Lopes, F. Activated carbon for hydrogen purification by pressure swing adsorption: Multicomponent breakthrough curves and PSA performance / F. Lopes, C. Grande, A. Rodrigues // Chem. Eng. Sci. – 2011. – Vol. 66 (3). – P. 303 – 317. doi:10.1016/j.ces.2010.10.034

19. Li, H. Modelling and simulation of two-bed PSA process for separating H_2 from methane steam reforming / H. Li, Z. Liao, J. Sun [et. al.] // Chin. J. Chem. Eng. – 2019. – Vol. 27 (8). – P. 1870 – 1878. doi:10.1016/ j.cjche.2018.11.022

20. Khajuria, H. Dynamic modeling and explicit/multi-parametric MPC control of pressure swing adsorption systems / H. Khajuria, E. Pistikopoulos // Journal of Process Control. – 2011. – Vol. 21. – P. 151 – 163. doi:10.1016/ j.jprocont.2010.10.021

21. Ye, F. Artificial neural network based optimization for hydrogen purification performance of pressure swing adsorption / F. Ye, S. Ma, L. Tong [et. al.] // Int. J. Hydrogen Energy. – 2019. – Vol. 44 (11). – P. 5334 – 5344. doi:10.1016/ j.ijhydene.2018.08.104

22. Reid, R. The properties of gases and liquids. Third Edition / R. Reid, J. Prausnitz, T. Sherwood. – McGraw-Hill, 1977. – 707 p.

23. Ohs, B. Optimized hollow fiber sorbents and pressure swing adsorption process for H-2 recovery / B. Ohs, J. Lohaus, D. Marten [et. al.] // Ind. Eng. Chem. Res. – 2018. – Vol. 57 (14). – P. 5093 – 5105. doi:10.1021/acs.iecr.7b05368

24. Arora, A. Optimal synthesis of periodic sorption enhanced reaction processes with application to hydrogen production / A. Arora, I. Bajaj, S. Iyer [et. al.] // Comput. Chem. Eng. – 2018. – Vol. 115. – P. 89 – 111. doi:10.1016/j.compchemeng. 2018.04.004

25. Akulinin, E. I. Optimizing pressure-swing adsorption processes and installations for gas mixture purification and separation / E. I. Akulinin, O. O. Golubyatnikov, D. S. Dvoretsky [et. al.] // Chemical Engineering Transactions. – 2019. – Vol. 74. – P. 883 – 888. doi: 10.3303/CET1974148

26. Yavary, M. The effect of number of pressure equalization steps on the performance of pressure swing adsorption process / M. Yavary, H. A. Ebrahim, C. Falamaki // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2015. – Vol. 87. – P. 35 – 44. doi:10.1016/j.cep.2014.11.003

27. Sanchez, R. Numerical modelling and simulation of hydrogen production via four different chemical reforming processes: process performance and energy requirements / R. Sanchez, L. Riboldi, H. Jakobsen // Can. J. Chem. Eng. – 2017. – Vol. 95 (5). – P. 880 – 901. doi:10.1002/cjce.22758

28. Abdeljaoued, A. Simulation and experimental results of a PSA process for production of hydrogen used in fuel cells / A. Abdeljaoued, F. Relvas, A. Mendes [et. al.] // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2018. – Vol. 6 (1). – P. 338 – 355. doi:10.1016/j.jece.2017.12.010

29. Tavan, Y. A note on an integrated process of methane steam reforming in junction with pressure-swing adsorption to produce pure hydrogen: Mathematical modeling / Y. Tavan, S. H. Hosseini, M. Olazar // Ind. Eng. Chem. Res. – 2015. – Vol. 54 (51). – P. 12937 – 12947. doi:10.1021/acs.iecr.5b01477

30. Karagoz, S. Multi-scale modeling and simulation of a novel membrane reactor (MR)/adsorptive reactor (AR) process / S. Karagoz, T. Tsotsis, V. Manousiouthakis // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2019. – Vol. 137. – P. 148 – 158. doi:10.1016/j.cep.2019.01.012

31. Akulinin, E. I. Numerical study of cyclic adsorption processes of air oxygen enrichment in dynamics / E. I. Akulinin, O. O. Golubyatnikov, D. S. Dvoretsky [et. al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – P. 012005. doi:10.1088/1742-6596/1278/1/012005

32. Delgado, J. Adsorption and Diffusion of H_2, CO, CH_4, and CO_2 in BPL Activated Carbon and 13X Zeolite: Evaluation of Performance in Pressure Swing Adsorption Hydrogen Purification by Simulation / J. Delgado, V. Agueda, M. Uguina [et. al.] // Ind. Eng. Chem. Res. – 2014. – Vol. 53 (40). – P. 15414 – 15426. doi:10.1021/ie403744u.

33. Dubinin, M. M. Progress in surface and membrane science. Vol. 9 / M. M. Dubinin. – New York : Academic Press, 1975. – P. 1 – 70.

34. Ergun, S. Fluid flow through packed columns / S. Ergun // Chem. Eng. Progress. – 1952. – Vol. 48. – P. 89 – 94.

35. Akulinin, E. I. Optimization and analysis of pressure swing adsorption process for oxygen production from air under uncertainty / E. I. Akulinin, O. O. Golubyatnikov, D. S. Dvoretsky [et. al.] // Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly. – 2020. – Vol. 26 (1). – P. 89 – 104. doi:10.2298/CICEQ190414028A

36. Rice, R. G. Applied mathematics and modeling for chemical engineers / R. G. Rice, D. D. Do. – Wiley, New Jersey, 2012. – 396 p.

Simulation und Untersuchung der Dynamik der Adsorptionstrennung von Synthesegas und Wasserstoffkonzentration

Zusammenfassung: Basierend auf der Theorie der volumetrischen Füllung von Mikroporen des Akademiemitglieds M.M. Dubinin, ist ein mathematisches Modell der Dynamik zyklischer Adsorptionsprozesse bei der Trennung von Synthesegas entwickelt, das den Einfluss des Stoff- und Wärmeübergangs in der Gas- und Festphase auf die Kinetik des Diffusionsübergangs eines Adsorptionsmittels (Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Wasserstoff) in der Adsorbensschicht und unter Berücksichtigung aller im Prozessflussdiagramm enthaltenen Geräte (Adsorber, Kompressor, Vakuumpumpe, Ventile, Drossel, Auffänger) berücksichtigt. Numerische Untersuchungen des Prozesses der Trennung von Synthesegas und der Wasserstoffkonzentration in einer Vieradsorberanlage mit körnigem Zeolithadsorptionsmittel NaX sind unter Verwendung der Methode der mathematischen Modellierung durchgeführt: Einfluss der Störbeeinflussungen (Zusammensetzung und Temperatur des anfänglichen wasserstoffhaltigen Gasgemisches), Betrieb (Zyklusdauer, Drücke am Kompressorausgang und am Eingang der Vakuumpumpe, Rückflusskoeffizient) und Auslegungsparameter (Länge des Schüttbettes des Adsorbents und Innendurchmesser des Adsorbers) auf die Reinheit des Wasserstoffprodukts, den Extraktionsgrad und die Produktivität der Anlage durchgeführt. Es sind die gefährlichsten störenden Wirkungen und die effektivsten Betriebsparameter des zyklischen Adsorptionsprozesses der Synthesegasabtrennung bestimmt. Es ist festgestellt, dass ein Temperaturanstieg im Bereich von 298...323 K und eine Abnahme der Wasserstoffkonzentration von 68 auf 48 Vol.% im anfänglichen Gasgemisch zu einer Abnahme des Wirkungsgrades der Anlage um ~ 10% aufgrund einer Abnahme des Extraktionsgrades des Produktwasserstoffs führen. Für die effektive Auswahl der Betriebsarten der Adsorptionsanlage sind praktische Empfehlungen formuliert, die das Erreichen der erforderlichen Reinheit des Produktwasserstoffs in Höhe von 99,99 Vol.% unter dem Einfluss von Störungen sicherstellen.

Modélisation et étude de la dynamique de la separation par adsorption du gaz de synthèse et de la concentration en hydrogène

Résumé: A la base de la théorie du remplissement volumineux des micropores de l'académitien M. M. Doubinin est élaboré le modèle mathématique de la dynamique cyclique des processus de l'adsorption lors de la division du gaz de synthèse tenant compte de l'impact des processus de transfert de masse et de chaleur dans les phases gazeuse et le solide sur la cinétique du transfert de la diffusion de transfert de l'adsorbant (dioxyde de carbone, monoxyde de carbone, d'hydrogène) dans la couche d'adsorbant et compte tenu de tous les appareils entrant dans le schéma technologique du processus (adsorbant, compresseur, vide-pompe, vannes, clapet, réservoir). Par la méthode de la modélisation mathématique sont exécutées les études numériques du

processus de la séparation de gaz de synthèse et de la concentration de l'hydrogène dans une installation avec un adsorbant granulé zéolitique NaX: est étudiée l'influence des perturbateurs (composition et température du mélange), de régime (durée du cycle, pression de sortie du compresseur et l'entrée à vide de la pompe, coefficient d'inversion de l'écoulement) et les paramètres de conception (de la longueur de la couche de remplissement de l'adsorbant et du diamètre intérieur de l'adsorbant) sur la pureté de l'hydrogène, le degré d'extraction et la capacité de l'installation. Sont définis les effets perturbateurs les plus dangereux et les paramètres de fonctionnement les plus efficaces du processus d'adsorption cyclique de la séparation des gaz de synthèse Est constaté que l'augmentation de la température dans la plage de 298...323 K et la diminution de la concentration d'hydrogène de 68 à 48 vol.% dans le mélange de gaz entraîne une diminution de l'efficacité de l'installation d'environ 10% en réduisant le degré d'extraction de l'hydrogène. Sont formulées des recommandations pratiques pour un réglage efficace des modes de fonctionnement de l'installation d'adsorption, garantissant la pureté de l'hydrogène à 99.99 vol.% en cas de perturbations.

Авторы: ***Акулинин Евгений Игоревич*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; ***Голубятников Олег Олегович*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; ***Лабутин Александр Николаевич*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Технической кибернетики и автоматики», ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», г. Иваново, Россия; ***Дворецкий Дмитрий Станиславович*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; ***Дворецкий Станислав Иванович*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: ***Гатапова Наталья Цибиковна*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

УДК 656.71
DOI: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.357-362

ПРОБЛЕМЫ ИНТЕГРАЦИИ НА ЕДИНОЙ ПЛАТФОРМЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И СИСТЕМ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ АЭРОПОРТОВ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

М. В. Юшин[1], А. В. Сбитнев[2]

Кафедры: технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта (1), ytvic88@yandex.ru; основ радиотехники и защиты информации (2), ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет гражданской авиации», г. Москва, Россия

Ключевые слова: авиационная безопасность; интеграция; моделирование; уязвимость.

Аннотация: Рассмотрены проблемы интеграции на единой платформе технических средств и систем по обеспечению безопасности аэропортов. Выявлены основные задачи и пути решения проблем. Проведен анализ проблем и методов обеспечения авиационной безопасности в целях обозначения направления научно-методических основ динамической интеграции средств обеспечения авиационной безопасности аэропорта.

Основополагающая идея исследования заключается в анализе научных проблем в области авиационной безопасности в аэропортах [1]. На основе данной идеи создается концепция научных исследований (рис. 1). Как идея, так и концепция отражают личную точку зрения автора на проблемы авиационной безопасности в аэропортах и подходы к их решению. Сформулируем данные проблемы исходя из возможности их решения с использованием научных методов, таких как: методы системного проектирования, теория принятия решений, теория тисков, теория квалиметрии, моделирование и эвристический подход [2].

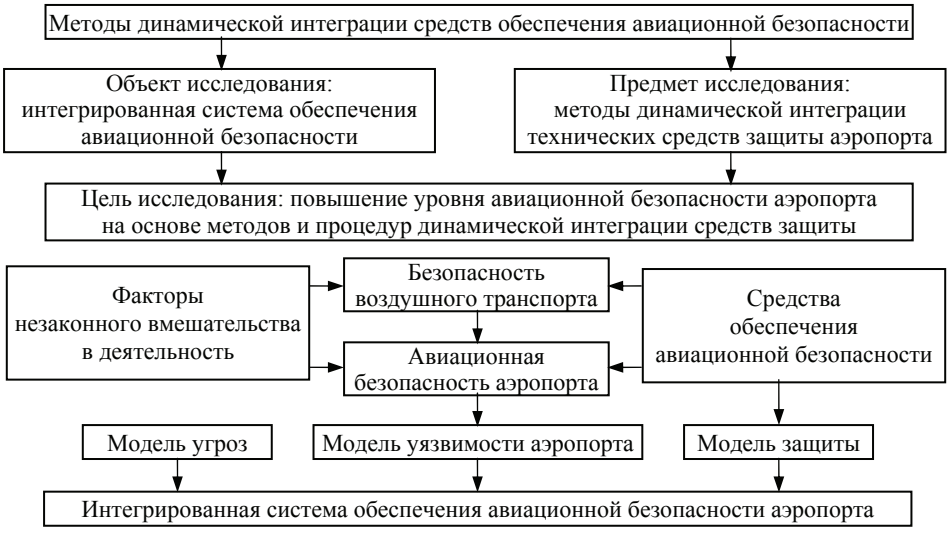


Рис. 1. Методы динамической интеграции средств обеспечения авиационной безопасности

Постановка задач

Первая проблема связана с организацией систем авиационной безопасности. Существующие системы функционируют как организационные и директивные. Предполагается, что функционирование таких систем с достаточной эффективностью может быть гарантировано путем разработки и реализации комплекса нормативных документов, которые предписывают и регулируют состав, структуру, параметры и другие элементы систем защиты. Такое управление определяется как законодательство, в каком-то смысле оно необходимо, но в условиях современных негативных тенденций в области безопасности полетов оно является недостаточным и не отвечает современным требованиям, прежде всего отметим, что регуляторное управление не учитывает фактор времени.

Фактически, с момента получения полной информации о факторе несанкционированного вмешательства в деятельность гражданской авиации, его анализа, разработки мер реагирования и корректировки нормативной базы прошло много времени, в течение которого исследуемый фактор может претерпеть значительные изменения. В этих условиях невозможно говорить о реальном процессе управления процедурами авиационной безопасности. Решением данной проблемы может быть разработка и внедрение системы управления воздушным движением аэропорта в смысле теории идеального управления, выбор и описание критерия идеального управления, его измерение и модификация параметров системы воздушной безопасности, согласно полученным данным [3].

Вторая проблема связана с процедурами оценки уровня авиационной безопасности. Единственным правильным шагом в данном направлении является постановление Правительства РФ от 10 декабря 2008 года № 940 «Об уровнях безопасности объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств и порядке их объявления (установления)», которое вводит понятие трех уровней безопасности. Однако границы данных уровней во время оценки довольно запутанные, процедуры оценки не имеют точных критериев оценки, невозможно получить количественное представление об оценке, откуда сложно сформировать идеальный контроль уровня безопасности.

Третья проблема определяется человеческим фактором. Не секрет, что в современных системах обеспечения авиационной безопасности человек как элемент системы является самым слабым звеном, поскольку современные технические средства значительно превосходят физиологические параметры человека по своим параметрам. Задача – минимизировать человеческий фактор.

Четвертая проблема – концепция интегрированных систем авиационной безопасности. Процедуры системной интеграции довольно сложны. На сегодняшний день не существует единого подхода к определению и формализации таких процедур. Основным критерием интеграции таких систем должен быть фактор адаптивности, то есть система должна обеспечивать приемлемый уровень безопасности аэропорта, соответствующий уровню угроз, действующих в настоящий момент.

Пятая проблема связана с динамичным характером угроз со стороны незаконных субъектов. Решение возможно путем создания систем безопасности с изменяемой структурой.

Таким образом, основная научная идея исследования заключается в следующем: решение современных проблем в области авиационной безопасности аэропортов заключается в создании научно обоснованных методов динамической интеграции средств обеспечения авиационной безопасности, на основе которой можно разработать адаптивные системы безопасности с изменяемой структурой, основанные на количественной оценке авиационной безопасности.

Рис. 2. Проблемы интеграции

Пути решения

Идея исследования основана на двух основных подходах – принципе моделирования и принципе уязвимости объектов в транспортных инфраструктурах и транспортных средствах (см. рис. 1). Данные принципы стимулируют разработку интегрированной системы авиационной безопасности для аэропорта на основе структурных моделей объектов транспортной или авиационной безопасности и создание адаптивной системы управления процедурой интеграции, включающих переменную структуру интегрированной системы, оптимизированы согласно соответствующему критерию, для которого выбирается уязвимость объекта. В этом случае устанавливается определенная аналогия между понятиями уязвимости объекта и качеством его защиты с учетом понятия риска.

В то же время методы управления динамической интеграцией системы авиационной безопасности аэропорта включают разработку систем, теорию принятия решений, квалиметрию, теорию риска и эвристический подход. Безопасность аэропорта в контексте безопасности воздушного транспорта определяется, с одной стороны, факторами незаконного вмешательства в деятельность гражданской авиации и, с другой – гарантией авиационной безопасности, когда данные факторы представляют собой модель угрозы, и система безопасности формализована в модели защиты [4].

Результаты противостояния между этими двумя частями отражены в модели уязвимости объекта, которая является основой для развития системы авиационной безопасности аэропорта. Концепция взаимодействия моделей представлена в табл. 1.

Таблица 1

Взаимодействие моделей

Модель угроз		Модель защиты	
Что защищаем	Критические элементы	Как защищаем	Обнаружение Отражение
От чего	Угрозы	С помощью чего	Технические средства Организационные мероприятия Силовые подразделения
От кого	Нарушители	Как управляем ситуацией	Эшелонирование объекта Сценарии защиты Способы интеграции Управление инцидентами

Под адаптивным управлением в данном случае понимается то, что оно соответствует условиям, факторам и критериям, которые формируются извне и внутри по отношению к системе экологического менеджмента. Указанные условия, факторы и критерии отражаются в уязвимости модели [5]. Основной целью адаптивного управления является динамическая структура средств авиационной безопасности аэропорта, то есть адаптивное управление интеграцией можно рассматривать как оптимизацию структуры технических средств. Для оптимизации структуры предлагается использовать два критерия: качество и риски, поскольку предполагается, что все остальные критерии, факторы и условия «скрыты» внутри критерия «качества». В данном случае задача оптимизации структуры (динамическая интеграция оборудования) становится единым критерием, предполагающим получение решения (методологии), реализация которого в современном аэропорту не представляет принципиальных проблем. Задача оптимизации структуры технических средств авиационной безопасности предполагает выявление всех факторов, влияющих на данную структуру. Для этого, используя системный подход, необходимо сформировать соответствующие модели.

Представленная на рис. 3 структура моделей довольно условна, поскольку модели пересекаются по своему функциональному назначению и значительному значению. С другой стороны, их следует рассматривать динамически, что подразумевает отсутствие их формального описания. Кроме того, учитывая взаимозависимость, некоторые модели являются базовыми, определяющими взаимосвязи в сложной системе «Аэропорт как объект несанкционированного вмешательства», другие – косвенными, которые относятся к первичной части либо целевой, возникающей в результате взаимодействия базовых моделей. В этом случае в предложенной разбивке выделим основные модели: модель уязвимости и модель интеграции оборудования. Модели оптимизации структуры оборудования и адаптивного управления являются целевыми, другие – могут рассматриваться как посредники.

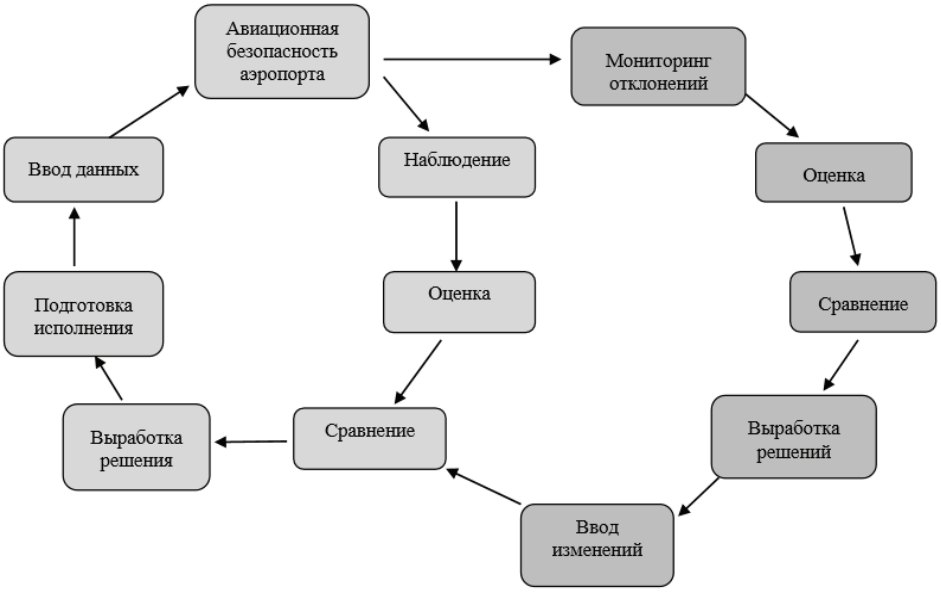


Рис. 3. Концепция адаптивного управления комплексной интеграцией авиационной безопасности аэропорта

Выводы

Научно-методической основой динамической интеграции авиационной безопасности в аэропорту является концепция уязвимости транспортной инфраструктуры и оборудования. Концепция динамической интеграции связана с динамическими характеристиками и параметрами угроз безопасности аэропорта и требует, чтобы система защиты аэропорта должным образом реагировала на эти угрозы, контролируя структуру, характеристики и параметры системы безопасности полета. Понятие уязвимости определяет степень защиты объекта транспортной инфраструктуры и технического оборудования от угроз несанкционированного вмешательства в их деятельность.

Анализ известных методов и процедур оценки уязвимости показал определенное несоответствие между этими методами и современными требованиями к защите аэропорта и невозможность их практического использования при создании систем защиты аэропорта от несанкционированного вмешательства в систему их деятельности. Предложен модельный подход для решения данной проблемы.

Список литературы

1. О Федеральной системе обеспечения защиты деятельности гражданской авиации от актов незаконного вмешательства : Постановление Правительства РФ от 30.07.1994 г. № 897. – Текст : электронный // Гарант : офиц. сайт. – URL : https://base.garant.ru/103778/ (дата обращения: 30.06.2020).

2. Об утверждении Федеральных авиационных правил «Требования авиационной безопасности к аэропортам»: приказ Минтранса РФ от 28.11.2005 г. № 142. – Текст : электронный // Гарант : офиц. сайт. – URL : https://base.garant.ru/189043/ (дата обращения: 30.06.2020).

3. Will ADS-B Increase Safety and Security for Aviation? – Текст : электронный // AirSport Corporation – Sallisaw, 2018. – URL : http://www.airsport-corp.com/adsb2.htm (дата обращения: 30.06.2020).

4. Meidani M. How to measure the similarity between two signal? – Текст : электронный // Research Gate. – Урмия, 2015. – URL : https://www.researchgate.net/post/how_to_measure_the_similarity_between_two_signal (дата обращения: 30.06.2020).

5. Авиационная безопасность : учебное пособие / Под общ. ред. Ю. М. Волынского-Басманова. – М. : АБИНТЕХ, 2009. – 692 с.

Problems of Integrating Airport Security Tools and Systems on a Single Platform and their Solutions

M. V. Yushin[1], A. V. Sbitnev[2]

Department of Technical Operation of Radio-Electronic Equipment for Air Transport (1), ymvic88@yandex.ru;
Department of Fundamentals of Radio Engineering and Information Protection (2), Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

Keywords: aviation security; integration; modeling; vulnerability.

Abstract: The problems of integrating airport security tools and systems on a single platform are considered. The main problems and ways of their solution have been identified. The analysis of the problems and methods of ensuring aviation security has been made. It is aimed to establish the direction of scientific and methodological foundations of the dynamic integration of aviation security tools of the airport.

References

1. https://base.garant.ru/103778/ (accessed 30 June 2020).
2. https://base.garant.ru/189043/ (accessed 30 June 2020).
3. http://www.airsport-corp.com/adsb2.htm (accessed 30 June 2020).
4. https://www.researchgate.net/post/how_to_measure_the_similarity_between_two_signal (accessed 30 June 2020).
5. Volynsky-Basmanov Yu.M. [Ed.] *Aviatsionnaya bezopasnost': uchebnoye posobiye* [Aviation security: a tutorial], Moscow: ABINTEKH, 2009, 692 p. (In Russ.)

Integrationsprobleme auf einer einzigen Plattform für technische Mittel und Systeme für die Sicherheit von Flughäfen und deren Lösungen

Zusammenfassung: Es sind die Probleme der Integration auf einer einzigen Plattform der technischen Mittel und Systeme für die Sicherheit von Flughäfen betrachtet. Die Hauptaufgaben und Lösungswege sind identifiziert. Die Analyse der Probleme und Methoden der Gewährleistung der Flugsicherheit zwecks der Benennung der Richtung der wissenschaftlichen und methodischen Grundlagen der dynamischen Integration der Mittel der Versorgung der Flugsicherheit des Flughafens ist durchgeführt.

Problèmes d'intégration sur une plate-forme des moyens techniques et des systèmes de sécurité des aéroports et voies de leur solution

Résumé: Sont abordés des problèmes d'intégration sur une plate-forme unique des moyens techniques et des systèmes de sécurité des aéroports. Sont identifiés les principaux défis et moyens de résoudre les problèmes. Est réalisée une analyse des problèmes et des pratiques en matière de sûreté de l'aviation afin d'orienter les fondements scientifiques et méthodologiques de l'intégration dynamique des moyens de sûreté de l'aviation dans les aéroports.

Авторы: ***Юшин Михаил Викторович*** – соискатель кафедры технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта; ***Сбитнев Александр Васильевич*** – кандидат технических наук, доцент кафедры основ радиотехники и защиты информации, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет гражданской авиации», г. Москва, Россия.

Рецензент: Громов Юрий Юрьевич – доктор технических наук, профессор, директор Института автоматики и информационных технологий, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

УДК 004.4.068
DOI: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.363-370

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СЕТИ ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ШКОЛ

В. Г. Мокрозуб, С. А. Рачкова, Ф. И. Вшивков

Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», mokrozubv@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия

Ключевые слова: место строительства; общеобразовательные школы; оптимизация; системный анализ; функциональная диаграмма.

Аннотация: Дано описание элементов проекта автоматизированной системы поддержки принятия решений при проектирования сети общеобразовательных школ: функциональной диаграммы, функционального представления, задачи оптимизации сети общеобразовательных школ по критерию их суммарной стоимости. Функциональная диаграмма представлена в формате IDEF0 и содержит описание всех информационных потоков. В функциональном представлении определены информационные модели, необходимые для выполнения функциональных блоков IDEF0. В задаче оптимизации дано описание исходных данных, результатов решения и ограничений, задаваемых нормативными документами на осуществление образовательной деятельности в РФ.

Введение

Городские территории находятся в постоянном развитии, связанном с миграцией населения, строительством и реконструкцией жилых домов, производственных объектов и объектов социальной инфраструктуры. Так, например, в северной части города Тамбова, где на сегодняшний день ведется активное жилищное строительство, значительно меняется численность населения. В ближайшие три года население Тамбова, с учетом построенных и введенных в эксплуатацию жилых домов, увеличится на 52 000 человек, из них более 6 500 человек – дети школьного возраста. В соответствии со стратегией социально-экономического развития Тамбовской области до 2035 года планируется построить 29 новых школ и отремонтировать 220 существующих [1]. На данные цели выделяются значительные денежные средства, правильное распределение которых в современных условиях невозможно без применения автоматизированных систем поддержки принятия решений (**АСППР**).

Вопросам принятия решений при проектировании и строительстве объектов социального назначения, в том числе и общеобразовательных школ, посвящено достаточно много публикаций. Так, в работе [2] систематизированы основные проблемы, с которыми сталкивается застройщик и государство при строительстве объектов социальной инфраструктуры, приведен примерный перечень мер, которые могут улучшить сложившуюся ситуацию. Автор [3] рассматривает соотношение понятий «устойчивый город» и «умный город». В работе [4] представлена перспектива нарастания дефицита учебных мест в системе общего образования Российской Федерации в период 2014 – 2025 гг. Многокритериальная оптимиза-

ционная модель устойчивого развития большого города представлена в работе [5]. Методы проектирования социальной инфраструктуры на развивающихся территориях на основе гравитационного моделирования рассмотрены в [6]. В работе [7] дано описание моделирования для принятия решений при градостроительном проектировании на примере оптимизации сети муниципальных образовательных учреждений.

Несмотря на наличие большого числа публикаций, посвященных строительству общеобразовательных школ, системные исследования автоматизации поддержки принятия решений в школьном строительстве представлены недостаточно.

Цель работы – разработка в соответствии с методологией [8, 9] следующих элементов АСППР:

– функциональной диаграммы IDEF0 процессов, для которых создается АСППР;

– функционального представления процессов, для которых создается АСППР;

– постановка задачи оптимизации сети общеобразовательных школ.

Функциональная диаграмма IDEF0 процессов проектирования и строительства сети школ

Основными процессами проектирования и строительства сети школ являются (рис. 1):

– анализ обеспеченности школьными местами и принятия решения о строительстве школ;

– оптимизация сети подлежащих строительству школ;

– разработка проектно-сметной документации;

– строительство сети школ.

Основные информационные потоки:

$I_0 – I_4$ – входная и выходная информация:

I_0 – существующие школы и их загруженность;

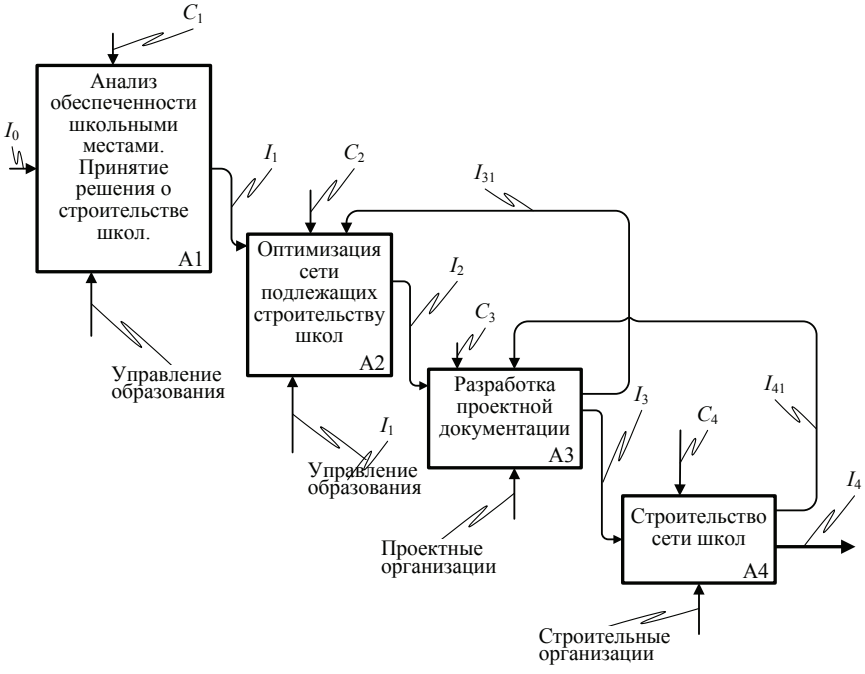


Рис 1. Функциональная диаграмма процесса проектирования и строительства сети общеобразовательных школ

I_1 – потребность в школьных местах;

I_2 – координаты школ, число мест в каждой из них, предварительная стоимость каждой школы;

I_3 – проектная документация, сметная стоимость каждой школы;

I_4 – сеть построенных школ;

I_{31}, I_{41} – обратные связи.

C_1 – C_4 – управляющая информация:

C_1 – нормативы обеспеченности школьными местами, численность и распределение школьников, существующая обеспеченность школьными местами;

C_2 – нормативы обеспеченности школьными местами, план территории, плотность населения;

C_3 – нормативы по проектированию школ;

C_4 – нормативы строительства школ.

Функциональное представление процессов проектирования и строительства сети школ

Функциональное представление FM, предназначенное для преобразования информационного потока I_0 в информационный поток I_4 с использованием информационных моделей IM, представим в виде:

$$FM : I_0 \xrightarrow{IM} I_4,\ FM =< F_1, F_2, F_3, F_4 >,\ IM =< IM_1, IM_2, IM_3, IM_4 >;$$

$$F_1 : I_0 \cup C_1 \xrightarrow{IM_1} I_1,\ F_2 : I_1 \cup C_2 \cup I_{31} \xrightarrow{IM_2} I_2;$$

$$F_3 : I_2 \cup C_3 \cup I_{41} \xrightarrow{IM_3} I_1 \cup I_{31},\ F_4 : I_3 \cup C_4 \xrightarrow{IM_4} I_4 \cup I_{41},$$

где F_1, IM_1 – функциональное представление и информационная модель принятия решения о строительстве школы соответственно; F_2, IM_2 – функциональное представление и информационная модель оптимизации сети школ соответственно; F_3, IM_3– функциональное представление и информационная модель разработки проектной документации соответственно; F_4, IM_4 – функциональное представление и информационная модель строительства школ соответственно.

Постановка задачи оптимизации сети общеобразовательных школ

Задача оптимизации сети общеобразовательных школ заключается в следующем. Для заданной городской территории, в которой проживает известное число учащихся, найти число школ, мощность каждой из них, место строительства и районы, обслуживаемые каждой школой, которые составляют минимум суммарной стоимости школ и позволяют проводить образовательный процесс в соответствии с существующими нормативными документами.

Обозначим:

$T =< D, SDD, PD >$ – заданная городская территория (множество точек земной поверхности, ограниченное замкнутой кривой);

$D = \left\{ d_j,\ j = \overline{1, J} \right\}$ – множество домов, находящихся на территории, d_j – j-й дом, J – число домов;

$SDD = \left\{ sdd_j,\ j = \overline{1, J} \right\}$ – координаты домов, sdd_j – координаты j-го дома;

$PD = \left\{ pd_j, j = \overline{1, J} \right\}$ – число учащихся, проживающих в домах, pd_j – число учащихся, проживающих в j-м доме;

N – число школ, $1 \le N < N_{\max}$, $N_{\max}$ – максимальное число школ;

$R = \left\{ r_n, n = \overline{1, N} \right\}$ – множество районов, обслуживаемых школами, r_n – район, обслуживаемый n-й школой, $T = \bigcup_{n=1}^{N} r_n, \bigcap_{n=1}^{N} r_n = \varnothing$;

$M = \left\{ m_n, n = \overline{1, N} \right\}$ – мощности школ, m_n – мощность n-й школы;

$m_n \le m1_n + m2_n$, $m2_n$ – число учащихся, обучающихся во вторую смену в n-й школе, $m1_n \ge 0$, $m2_n \ge 0$, $m2_n / P_n \le KM$, KM – нормативный коэффициент;

$S = \left\{ s_n, n = \overline{1, N} \right\}$ – стоимости школ, s_n – стоимость строительства и обслуживания n-й школы, $SO = \sum_{i=1}^{N} s_i$ – суммарная стоимость строительства и обслуживания школ;

$SD = \left\{ sd_n, n = \overline{1, N} \right\}$ – места строительства школ (координаты), sd_n – место строительства n-й школы; $SD \in T$;

DN_n – дома, обслуживаемые n-й школой, $DN_n \in D, DN_n = \left\{ dn_n^i, i = \overline{1, I_n} \right\}$, dn_n^i – i-й дом, обслуживаемый n-й школой, I_n – число домов, обслуживаемых n-й школой; $p_n^i \in PD$ – число учащихся, проживающих в доме dn_n^i; $sdn_n^i \in SDD$ – местоположение дома dn_n^i;

P_n – число учащихся, обслуживаемых n-й школой, $P_n = \sum_{i}^{I_n} p_n^i$, p_n^i – число учащихся, проживающих в доме dn_n^i, $P_n = m1_n + m2_n$; $PO = \sum_{n=1}^{N} P_n$ – общее число учащихся, проживающих на заданной территории;

rs_n^i – расстояние от i-го дома до n-й школы, обслуживающей дом, $rs_n^i \le rs\max_p, rs\max_p$; $rs_n^i \le rs\max_a, rs\max_a$ – максимальные допустимые расстояния от дома до школы, если учащиеся идут пешком или едут на автобусе соответственно.

С учетом введенных ограничений формальная постановка задачи строительства сети общеобразовательных школ выглядит следующим образом.

Для заданной территории $T =< D, SDD, PD >$ найти такое число школ N^*, мощность каждой школы $M^* = \left\{ m_n^*, n = \overline{1, N^*} \right\}$, районы обслуживаемые каждой школой $R^* = \left\{ r_n^*, n = \overline{1, N^*} \right\}$ и место строительства школ $SD^* = \left\{ sd_n^*, n = \overline{1, N^*} \right\}$, для которых суммарная стоимость SO строительства и обслуживания школ будет минимальна:

$$SO\left(N^*, R^*, M^*, SD^*\right) \xrightarrow[N, R, M, SD]{} \min(SO),$$

при ограничениях:

$$1 \le N < N_{\max};$$

$$SO = \sum_{n=1}^{N} s_n;$$

$$s_n = s(m_n, sd_n, r_n);$$

$$PO = \sum_{n=1}^{N} P_n;$$

$$m_n \le m1_n + m2_n;$$

$$T = \bigcup_{n=1}^{N} r_n, \bigcap_{n=1}^{N} r_n = \varnothing;$$

$$m2_n / P_n \le KM;$$

$$rs_n^i \le rs\max_p \text{ или } rs_n^i \le rs\max_a;$$

$$rs_n^i = rs\left(sd_n, sdd_n^i\right).$$

Перечисленные выше ограничения в задаче оптимизации представляют собой информационную модель IM_2.

Заключение

Составлены функциональная диаграмма и функциональное представление процесса проектирования сети общеобразовательных школ. Поставлена задача оптимизации сети общеобразовательных школ по критерию суммарной стоимости школ. Исходные данные для задачи – территория, на которой необходимо построить сеть школ, координаты домов на этой территории и число детей школьного возраста в каждом доме. Искомые параметры – число школ, мощность каждой школы, дома, которые обслуживает школа.

Представленное описание предназначено для разработки АСППР при проектировании и строительстве школ. Дальнейшее развитие работы заключается в разработке алгоритмов решения задачи оптимизации и способов представления исходных данных в информационной системе.

Список литературы

1. О Стратегии социально-экономического развития Тамбовской области до 2035 года : Закон Тамбовской области от 30 мая 2018 года. – Текст : электронный // Администрация Тамбовской области. – URL : https://www.tambov.gov.ru/assets/files/strategy/bc9bb531-f06a-4e4e-92ac-f39f924f8bfb.pdf (дата обращения: 23.08.2020).

2. Особенности развития и строительства объектов социальной инфраструктуры. – Текст : электронный / В. Е. Морозов, А. В. Крапива, К. С. Петров [и др.] // Инженерный вестник Дона : электрон. науч. журнал. – 2020. – № 1 (61). – 6 с. – URL : https://elibrary.ru/download/elibrary_42691518_62419564.pdf (дата обращения: 23.08.2020).

3. Гунзенова, К. В. Концепция развития «устойчивого умного города». – Текст : электронный / К. В. Гунзенова // Вектор экономики : электронный научный журнал. – 2019. – № 2 (32). – 7 с. – URL : https://elibrary.ru/download/elibrary_37073905_57615792.pdf (дата обращения: 23.08.2020).

4. Башев, В. В. Оценка потребности в дополнительных учебных местах в системе общего образования РФ в 2014–2025 гг. / В. В. Башев, Д. К. Дехант, В. Р. Лозинг // Вопросы образования. – 2015. – № 4. – С. 254 – 273. doi: 10.17323/1814-9545-2015-4-254-273

5. Андреев, В. А. Многокритериальная оптимизационная модель устойчивого развития большого города при заданных вариантах кредитной политики / В. А. Андреев, Е. А. Платонова // Проблемы преобразования и регулирования региональных социально-экономических систем / Под ред. С. В. Кузнецова. – СПб. : ГУАП, 2019. – С. 4 – 10.

6. Федоров, А. П. Методы проектирования социальной инфраструктуры на развивающихся территориях на основе гравитационного моделирования / А. П. Федоров, О. Н. Колбина // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. – 2020. – № 1 (37). – С. 217 – 221.

7. Головин, А. В. Моделирование для принятия решений при градостроительном проектировании на примере оптимизации сети муниципальных образовательных учреждений / А. В. Головин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Урбанистика. – 2013. – № 2 (10). – С. 6 – 32.

8. Мокрозуб, В. Г. Системный анализ процессов принятия решений при разработке технологического оборудования / В. Г. Мокрозуб, Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 364 – 373. doi: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.364-373

9. Мокрозуб, В. Г. Постановка задачи разработки математического и информационного обеспечения процесса проектирования многоассортиментных химических производств / В. Г. Мокрозуб, Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 252 – 264. doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.252-264

System Analysis of Decision Support in the Design of a Secondary School Network

V. G. Mokrozub, S. A. Rachkova, F. I. Vshivkov

Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering, mokrozubv@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: construction site; general education schools; optimization; system analysis; functional diagram.

Abstract: The article describes the elements of the project of an automated decision support system in the design of a network of secondary schools: a functional diagram, a functional presentation, the problem of optimizing a network of secondary schools by the criterion of their total cost. The functional diagram is presented in IDEF0 format and contains a description of all information flows. The functional view defines the information models required to execute IDEF0 functional blocks. The optimization problem describes the initial data, solution results and restrictions set by regulatory documents for the implementation of educational activities in the Russian Federation.

References

1. https://www.tambov.gov.ru/assets/files/strategy/bc9bb531-f06a-4e4e-92ac-f39f924f8bfb.pdf (accessed 23 August 2020).

2. https://elibrary.ru/download/elibrary_42691518_62419564.pdf (accessed 23 August 2020).

3. https://elibrary.ru/download/elibrary_37073905_57615792.pdf (accessed 23 August 2020).

4. Bashev V.V., Dekhant D.K., Lozing V.R. [Assessment of the need for additional training places in the general education system of the Russian Federation in 2014–2025], *Voprosy obrazovaniya* [Education Issues], 2015, no. 4, pp. 254-273, doi: 10.17323/1814-9545-2015-4-254-273 (In Russ., abstract in Eng.)

5. Andreyev V.A., Platonova Ye.A., Kuznetsov S.V. [Ed.] *Problemy preobrazovaniya i regulirovaniya regional'nykh sotsial'no-ekonomicheskikh sistem* [Problems of transformation and regulation of regional socio-economic systems], St. Petersburg: GUAP, 2019, pp. 4-10. (In Russ.)

6. Fedorov A.P., Kolbina O.N. [Methods of designing social infrastructure in developing territories based on gravity modeling], *Informatsionnyye tekhnologii i sistemy: upravleniye, ekonomika, transport, pravo* [Information technologies and systems: management, economics, transport, law], 2020, no. 1 (37), pp. 217-221. (In Russ., abstract in Eng.)

7. Golovin A.V. [Modeling for decision making in urban planning by the example of optimization of a network of municipal educational institutions], *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Urbanistika* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Urban studies], 2013, no. 2 (10), pp. 6-32. (In Russ., abstract in Eng.)

8. Mokrozub V.G., Malygin Ye.N., Karpushkin S.V. [System analysis of decision-making processes in the development of technological equipment], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 3, pp. 364-373, doi: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.364-373 (In Russ., abstract in Eng.)

9. Mokrozub V.G., Malygin Ye.N., Karpushkin S.V. [Statement of the problem of development of mathematical and information support for the design process of multi-assortment chemical production], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 252-264, doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.252-264 (In Russ., abstract in Eng.)

Systemanalyse der Entscheidungsunterstützung bei der Gestaltung des Netzes der allgemeinbildenden Schulen

Zusammenfassung: Es ist die Beschreibung der Projektelemente eines automatisierten Entscheidungsunterstützungssystems beim Entwurf eines Netzwerks von allgemeinbildenden Schulen gegeben: ein Funktionsdiagramm, eine Funktionsdarstellung, Aufgaben der Optimierung des Netzes allgemeinbildender Schulen nach dem Kriterium ihrer Gesamtkosten. Das Funktionsdiagramm ist im IDEF0-Format dargestellt und enthält die Beschreibung aller Informationsflüsse. In der Funktionsansicht sind die für die Ausführung von IDEF0-Funktionsblöcken erforderlichen Informationsmodelle bestimmt. Das Optimierungsproblem beschreibt die Anfangsdaten, die Ergebnisse der Lösung und die Einschränkungen, die in den normativen Dokumenten für die Durchführung von Bildungsaktivitäten in der Russischen Föderation festgelegt sind.

Analyse systémique de l'aide à la prise des decisions lors de la conception d'un réseau d'écoles d'enseignement secondaire

Résumé: Est donnée la description des éléments du projet du système automatisé d'aide à la prise des décisions lors de la conception d'un réseau d'écoles secondaires: diagramme fonctionnel, représentation fonctionnelle, tâches d'optimisation du réseau des écoles en fonction de leur coût total. Le diagramme fonctionnel est présenté en format IDEF0 et décrit tous les flux d'informations. Dans la représentation fonctionnelle sont définis les modèles d'information nécessaires à l'exécution des blocs fonctionnels IDEF0. Dans la tâches d'optimisation du réseau d'optimisation sont décrites les données initiales, les résultats de la décision et les limites définies par les documents réglementaires pour la mise en œuvre des activités éducatives dans la Fédération de la Russie.

Авторы: Мокрозуб Владимир Григорьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; ***Рачкова Светлана Анатольевна*** – магистрант; ***Вшивков Федор Иванович*** – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: ***Литовка Юрий Владимирович*** **–** доктор технических наук, профессор кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

УДК 66.021:502.1
DOI: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.371-387

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КАЛИБРОВКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОАДСОРБЦИОННЫХ АППАРАТОВ СЕЛЕКТИВНОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ

Н. А. Меренцов[1], А. В. Персидский[2], М. В. Топилин[3], А. Б. Голованчиков[1]

Кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», steeple@mail.ru; ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (1); АО «Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады» (2); ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг ВолгоградНИПИморнефть» (3), г. Волгоград, Россия

Ключевые слова: адсорбция; газовые выбросы; массообмен; селективная очистка газов; сорбент; сорбция; фильтрационные течения; электроадсорбция.

Аннотация: Представлена схема автоматической калибровки технологических параметров электроадсорбционных массообменных аппаратов селективной очистки газовых выбросов на примере электроадсорбера непрерывного действия с подвижным слоем адсорбента. Программа калибровки базируется на автоматическом распознавании диапазонов регулирования режимов работы электроадсорбционных аппаратов на стадии пусконаладочных работ или в ходе текущей эксплуатации технологического массообменного оборудования. Калибровке подлежат гидродинамика фильтрационного течения через слой адсорбента и параметры электрического поля, при этом распознаются оптимальные фильтрационные режимы с точки зрения омывания гранул адсорбентов потоком сплошной газовой фазы, а определение пределов регулирования параметров электрического поля базируется на автоматической проверке качества изоляции электрической части массообменного аппарата, а также распознавании тока, возникающего в цепи при появлении движения ионов между заряженными поверхностями (ионного ветра). Программа калибровки и полученные с ее помощью параметры позволят самоадаптивной системе автоматизированного управления электроадсорбционными процессами добиваться наивысших показателей степеней очистки газовых выбросов при оптимальных энергетических затратах на осуществление массообменных процессов и предоставят возможность сгладить технологические, масштабные и другие факторы, свойственные конкретным массообменных процессам и конструкциям аппаратов.

Введение

Интенсификация процессов в химической промышленности связана с решением многоплановых комплексных научно-технических проблем и базируется как на традиционных, так и принципиально новых методах, опирающихся на последние достижения физики, химии и смежных областей науки. Использование раз-

личных физических эффектов и химических воздействий позволяет в значительной степени интенсифицировать химико-технологические процессы и в большинстве случаев получать результаты, недостижимые при традиционной технологии [1, 2].

Массообменные сорбционные аппараты различного назначения получили очень широкое применение в экологических процессах селективной очистки жидкостных и газовых выбросов, а также технологических процессах многих отраслей промышленности: химической, нефтехимической, нефтегазовой, металлургической, строительной, машиностроительной, пищевой, фармакологической, биохимической и др. [3 – 7]. Наиболее значительна роль массообменных процессов в экологии, так как защита окружающей среды от загрязнений является серьезной проблемой [8 – 20]. Использование процессов адсорбции и ионообмена в сочетании с физическими эффектами позволяет успешно выходить из сложнейших ситуаций. Санитарная очистка газов, обеззараживание и нейтрализация сточных и радиоактивных вод представляют собой серьезный комплекс технических и технологических процессов. Главной задачей, связанной с качественной работоспособностью и обеспечением должных показателей работы, таких как концентрации извлекаемых компонентов, степени очистки жидкостей и газов, является обеспечение устойчивого непрерывного режима работы и равномерного времени пребывания продуктов массообмена (сорбентов и сплошных фаз) в массообменных аппаратах. Одним из самых перспективных направлений совершенствования массообменных сорбционных процессов и аппаратов авторы считают наложение электрических полей заданной напряженности, что существенно интенсифицирует массообменные процессы, повышает степень улавливания извлекаемых из газа или жидкости (сплошной фазы) компонентов, повышает емкость сорбентов и увеличивает их время защитного действия [1]. Речь идет о таких массообменных процессах как электроадсорбция, ионный обмен в электрическом поле, электродесорбция, электроабсорбция, каждый из которых обладает своими технологическими особенностями и конструктивным аппаратурным оформлением [1, 2].

Цель работы – разработка систем автоматизированного распознавания и поддержания оптимальных режимов работы электроадсорбционных массообменных аппаратов, позволяющих обеспечить наивысшие доступные показатели степеней очистки извлекаемых из газовых потоков компонентов, в условиях наиболее полного использования емкости адсорбентов, продлевая время их защитного действия, в режимах энергосбережения и сохранности гранул адсорбентов от истирания и закупоривания микропор.

Следует отметить, что разработанная и представленная в данной работе схема автоматизированного управления режимами работы и калибровки технологических параметров массообменных электроадсорбционных аппаратов может быть адаптирована под любой тип электроадсорбционного процесса и аппарата любого конструктивного исполнения, как непрерывного, полупериодического, так и периодического действия, с подвижными, неподвижными и псевдоожиженными слоями сорбентов и т.д.

На примере разработанной конструкции электроадсорбера непрерывного действия рассмотрим прикладной пример и раскроем физический смысл автоматизированных систем калибровки технологических параметров и управления (рис. 1). В данной конструкции электроадсорбера реализована схема «плоского конденсатора», подразумевающая равномерность напряженности электрического поля между витками (обкладками), возникающего между противоположно заряженными сетчатыми винтовыми поверхностями *1* и *2* двухзаходного шнекового винта. Прототип данной конструкции подробно представлен в работе [21].

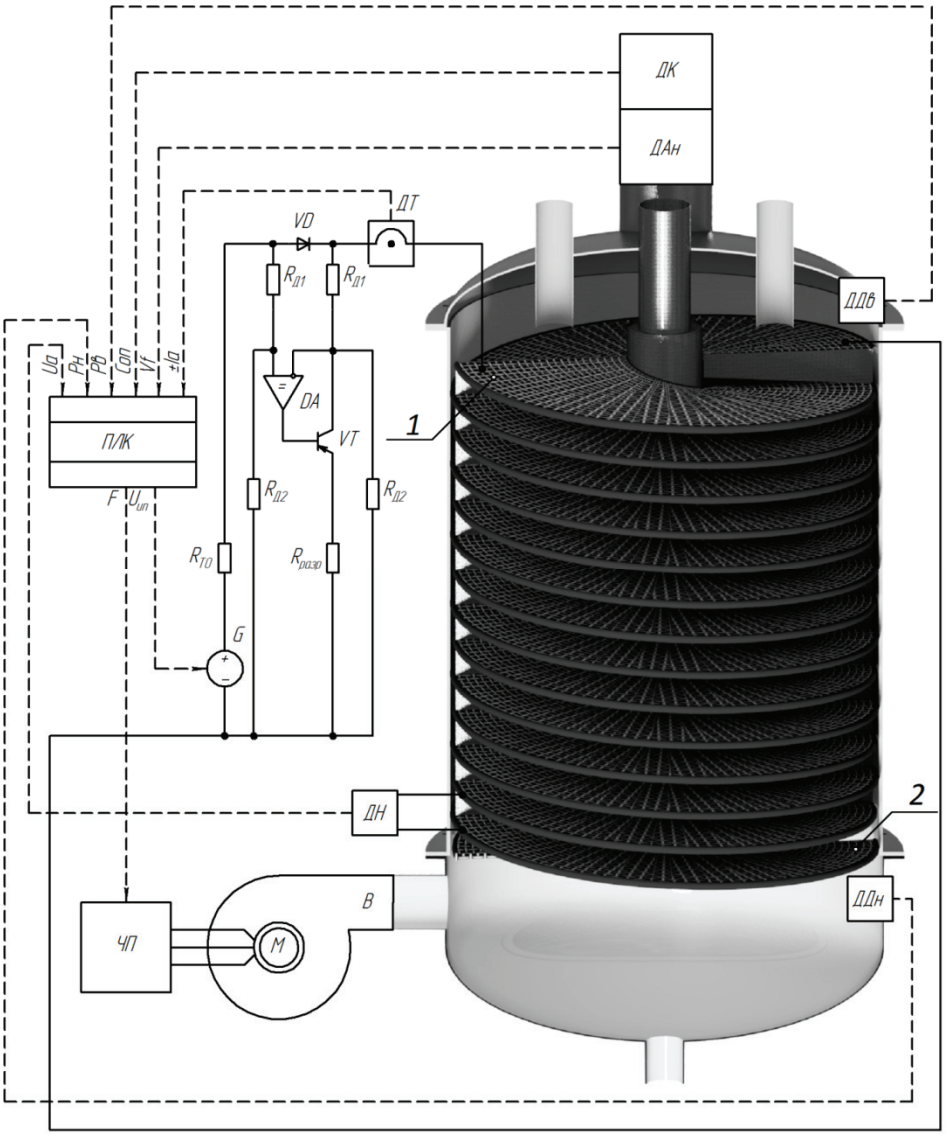


Рис. 1. Схема управления электроадсорбционным аппаратом непрерывного действия

Схема управления электроадсорбционным аппаратом непрерывного действия состоит из установленных на выходном газовом патрубке датчиков концентрации извлекаемого компонента *ДК* и анемометрического датчика *ДАн*, измеряющего скорость (расход) газового потока (см. рис. 1). В верхнем и нижнем патрубках адсорбера (также между витками) имеются датчики давления газа, соответственно *ДДв* и *ДДн*. Для нагнетания очищаемой сплошной газовой фазы в аппарат служит воздуходувка *В* с приводом от асинхронного электродвигателя *М*, запитанного через частотный преобразователь *ЧП*. Для создания внутри аппарата электрического поля два захода винтовых решеток электроадсорбера подключены к разным полюсам высоковольтного управляемого источника постоянного напряжения *G*. Для защиты источника напряжения от перегрузки по току служит токоограничивающий резистор R_{TO}. Для устранения эффекта сохранения напряжения между поверхностями аппарата, вследствие наличия у него электрической

емкости, служит цепь разряда, состоящая из компаратора на основе операционного усилителя *DA* и двух одинаковых делителей напряжения на резисторах *РД1* и *РД2*. При превышении напряжения между решетками аппарата над напряжением источника питания, вследствие уменьшения его выходного напряжения, выходным сигналом компаратора открывается транзистор *VT*, в результате чего через разрядное сопротивление *Rразр* начинает течь ток, пока напряжения источника питания и аппарата не сравняются. В цепи питания аппарата имеется датчик тока *ДТ* на эффекте Холла. Датчики данного типа могут измерять величину постоянного тока и восприимчивы к его направлению. К противоположным концам спиральных решеток аппарата присоединены вводы датчика напряжения *ДН*, который определяет фактическое напряжение между поверхностями аппарата. Сигналы датчиков передаются в программируемый логический контроллер *ПЛК*, где происходит выполнение управляющих программ. Сигналы управления от контроллера передаются на частотный преобразователь *ЧП*, который изменяет частоту вращения воздуходувки *B*, а также на источник питания *G*, изменяющий напряжение питания массообменного аппарата.

Перейдем к принципам автоматизированного регулирования процессом электроадсорбции и поиску оптимальных режимов работы, с учетом гидродинамики и параметров наложенного электрического поля на процесс электроадсорбции. Принцип автокалибровки и автоматизированного управления заключается в самоадаптации массообменной системы под эталонные (оптимальные) показатели работы, за счет наложения регулируемого электрического поля заданной напряженности на процессы электросорбции и распознавания наиболее эффективных гидромеханических режимов омывания поверхностей гранул сорбентов сплошной фазой при помощи индекса турбулизации, который служит инструментом оценки вклада инерционной составляющей структуры фильтрационного течения сплошной фазы через слой сорбента. Разработанные программы позволяют добиваться наивысших доступных показателей улавливания вредных компонентов из сплошной газовой фазы в условиях режимов энергосбережения массообменных сорбционных аппаратов.

Индекс турбулизации – индекс, получаемый в ходе аппроксимации экспериментально полученных однофазных (двухфазных) фильтрационных кривых течений через слои сорбентов, который является прямым отражением вклада инерционной составляющей в общую структуру фильтрационного течения. Наиболее пристальное внимание авторы начали уделять вкладу инерционной составляющей, так как в сорбционных массообменных аппаратах наивысшие показатели интенсивности массоотдачи наблюдаются в условиях интенсивного омывания гранул сорбентов потоком сплошной фазы. При этом предложены два различных метода определения индекса турбулизации, каждый из которых корректен и способен найти свое лабораторное и промышленное применение для определенного спектра массообменных процессов и аппаратов. Первым способом является определение инерционной составляющей структуры фильтрационного течения за вычетом вязкостной составляющей, что необходимо учитывать в условиях фильтрационных течений через слои относительно низкопроницаемых пористых сред для таких процессов, как ионный обмен, адсорбция, фильтрационная сушка и др. При этом используется модифицированное уравнение, обеспечивающее плавный переход от линейного вязкостного участка фильтрационной кривой к переходному нелинейному без разрыва полей скоростей и давлений:

$$\frac{\Delta P}{H} = \alpha\mu\upsilon_{\text{ф}} + \left(\frac{\upsilon_{\text{ф}} - \upsilon_{\text{кр}}}{B}\right)^{m},$$

где $\Delta P/H$ – удельное гидравлическое сопротивление слоя сорбента; α – коэффициент, отражающий влияние структуры пористого слоя на сопротивление, оказы-

ваемое фильтрационному течению силами вязкого трения; μ – динамическая вязкость сплошной фазы; $\upsilon_ф$ – скорость фильтрации сплошной фазы через слой сорбента; $\upsilon_{кр}$ – критическая скорость фильтрации, ограничивающая линейный участок фильтрационной кривой; *B* – коэффициент, определяемый структурой пористой среды; *m* – показатель степени, называющийся индексом турбулизации (для слоев сорбентов и ионитов). Таким образом, получаем инструмент для оценки вклада инерционной составляющей структуры фильтрационного течения за вычетом вязкостной составляющей, что позволяет осуществлять объективную оценку фильтрационным течениям, развивающимся по изначально несопоставимым гидродинамическим сценариям, и отследить формирование динамики турбулентного течения сплошной фазы через слои гранул сорбентов и ионитов. Второй способ определения индекса турбулизации применим при фильтрационных течениях через слои относительно высокопроницаемых пористых сред в условиях изначально несущественного вклада вязкостной составляющей структуры фильтрационного течения (абсорбция, испарительное охлаждение, мокрая очистка газов и др.) [22].

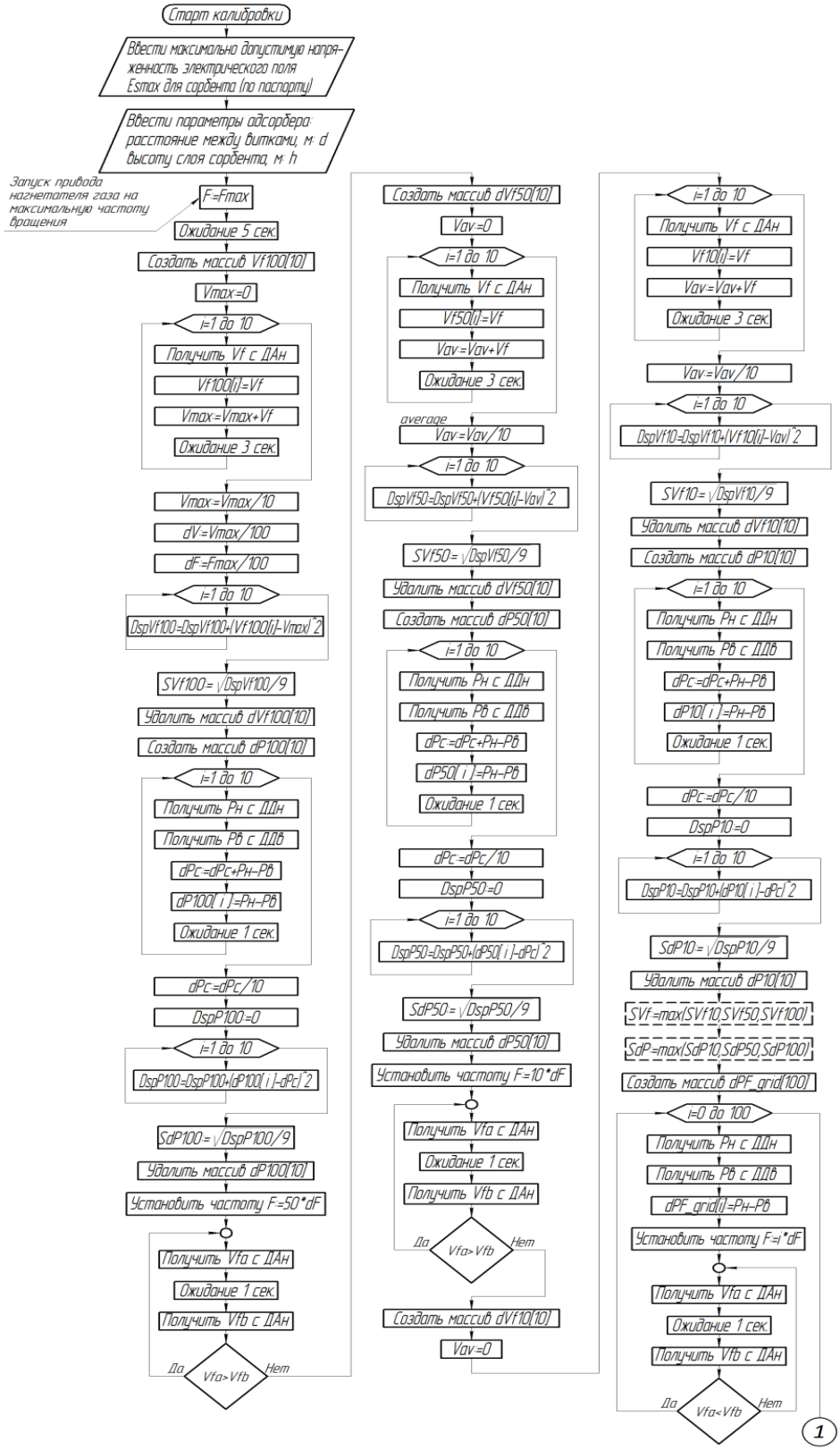
В алгоритм автокалибровки и автоматизированного регулирования закладываются следующие операции. Система управления массообменным аппаратом во время работы в автоматическом режиме непрерывно анализирует зависимость $\Delta P/H = f(\upsilon_f)$ («фильтрационные кривые»), то есть удельные гидравлические сопротивления восходящему потоку газа при плавно возрастающем расходе сплошной фазы. При этом на стадии калибровки аппарат снимает фильтрационную кривую газораспределительных решеток (сетчатых винтовых поверхностей) для последующего стадийного вычитания полученных данных из суммарных фильтрационных кривых через слои сорбентов.

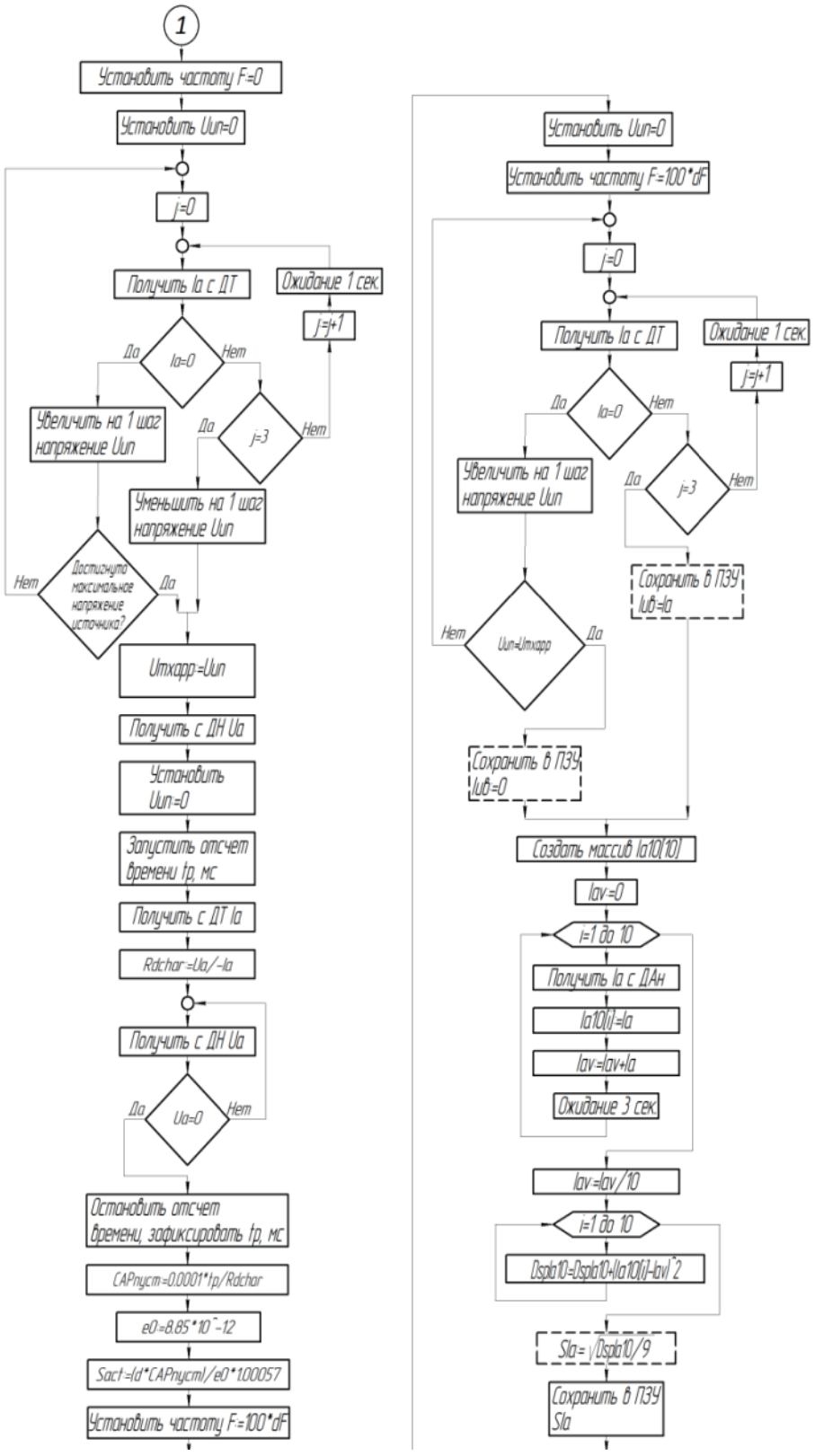
Из анализа зависимостей $\Delta P/H = f(\upsilon_f)$ потока сплошной газовой фазы через слои сорбентов программа получает сведения по гидродинамическим всплескам, то есть нарастающим инерционным составляющим структуры фильтрационного потока сквозь слой адсорбента, за вычетом вязкостных составляющих. Индекс турбулизации отражает динамику развития турбулентного течения сплошной фазы через слои гранул сорбентов, интенсивность омывания поверхностей адсорбентов и их внешнедиффузионных слоев, что приводит к резкой интенсификации массообменных процессов и повышению степени очистки газовых выбросов в сорбционных массообменных аппаратах.

Для определения всех необходимых технологических параметров работы электросорбционного массообменного аппарата перед первым запуском выполняется программа калибровки. Это автоматизированный процесс, алгоритм которого представлен на рис. 2.

Операция калибровки начинается с ручного ввода значений, которые нельзя определить автоматически: максимально допустимой напряженности электрического поля для сорбента *Es*max, которая является паспортной величиной для адсорбента и геометрических параметров массообменного аппарата; расстояния между витками *d*; высоты слоя сорбента *h*, определяемого как расстояние от винтовой поверхности до кромки радиальной перегородки; сопротивления разрядного резистора *Rdchar*.

На первом этапе программа определяет гидродинамические параметры, необходимые для последующего автоматизированного управления рабочим режимом аппарата, такие как среднеквадратическое отклонение показаний анемометрического датчика *ДАн* и величину шагов изменения скорости выходящего газового потока и частоты вращения воздуходувки *B*. Программа определяет максимальную скорость сплошной газовой фазы *V*max. Далее получает элементарные ступени регулирования скорости фильтрации *dV* и частоты вращения воздуходувки *dF*.


Старт калибровки
Ввести максимально допустимую напряженность электрического поля Esmax для сорбента (по паспорту)
Ввести параметры адсорбера: расстояние между витками, м: d высоту слоя сорбента, м: h
Запуск привода нагнетателя газа на максимальную частоту вращения
F:=Fmax
Ожидание 5 сек.
Создать массив Vf100[10]
Vmax:=0
i=1 до 10
Получить Vf с ДАн
Vf100[i]:=Vf
Vmax:=Vmax+Vf
Ожидание 3 сек.
Vmax:=Vmax/10
dV:=Vmax/100
dF:=Fmax/100
i=1 до 10
DspVf100:=DspVf100+(Vf100[i]-Vmax)^2
SVf100:=√(DspVf100/9)
Удалить массив dVf100[10]
Создать массив dP100[10]
i=1 до 10
Получить Рн с ДДн
Получить Рб с ДДб
dPc:=dPc+Рн-Рб
dP100[i]:=Рн-Рб
Ожидание 1 сек.
dPc:=dPc/10
DspP100:=0
i=1 до 10
DspP100:=DspP100+(dP100[i]-dPc)^2
SdP100:=√(DspP100/9)
Удалить массив dP100[10]
Установить частоту F:=50*dF
Получить Vfa с ДАн
Ожидание 1 сек.
Получить Vfb с ДАн
Vfa>Vfb
Да
Нет
Создать массив dVf50[10]
Vav:=0
i=1 до 10
Получить Vf с ДАн
Vf50[i]:=Vf
Vav:=Vav+Vf
Ожидание 3 сек.
average
Vav:=Vav/10
i=1 до 10
DspVf50:=DspVf50+(Vf50[i]-Vav)^2
SVf50:=√(DspVf50/9)
Удалить массив dVf50[10]
Создать массив dP50[10]
i=1 до 10
Получить Рн с ДДн
Получить Рб с ДДб
dPc:=dPc+Рн-Рб
dP50[i]:=Рн-Рб
Ожидание 1 сек.
dPc:=dPc/10
DspP50:=0
i=1 до 10
DspP50:=DspP50+(dP50[i]-dPc)^2
SdP50:=√(DspP50/9)
Удалить массив dP50[10]
Установить частоту F:=10*dF
Получить Vfa с ДАн
Ожидание 1 сек.
Получить Vfb с ДАн
Vfa>Vfb
Да
Нет
Создать массив dVf10[10]
Vav:=0
i=1 до 10
Получить Vf с ДАн
Vf10[i]:=Vf
Vav:=Vav+Vf
Ожидание 3 сек.
Vav:=Vav/10
i=1 до 10
DspVf10:=DspVf10+(Vf10[i]-Vav)^2
SVf10:=√(DspVf10/9)
Удалить массив dVf10[10]
Создать массив dP10[10]
i=1 до 10
Получить Рн с ДДн
Получить Рб с ДДб
dPc:=dPc+Рн-Рб
dP10[i]:=Рн-Рб
Ожидание 1 сек.
dPc:=dPc/10
DspP10:=0
i=1 до 10
DspP10:=DspP10+(dP10[i]-dPc)^2
SdP10:=√(DspP10/9)
Удалить массив dP10[10]
SVf:=max(SVf10,SVf50,SVf100)
SdP:=max(SdP10,SdP50,SdP100)
Создать массив dPF_grid[100]
i=0 до 100
Получить Рн с ДДн
Получить Рб с ДДб
dPF_grid[i]:=Рн-Рб
Установить частоту F:=i*dF
Получить Vfa с ДАн
Ожидание 1 сек.
Получить Vfb с ДАн
Vfa<Vfb
Да
Нет
1


1
Установить частоту F=0
Установить Uun=0
j=0
Получить Ia с ДТ
Ожидание 1 сек.
j=j+1
Да
Ia=0
Нет
Увеличить на 1 шаг напряжение Uun
Да
j=3
Нет
Уменьшить на 1 шаг напряжение Uun
Нет
Достигнуто максимальное напряжение источника?
Да
Umxapp=Uun
Получить с ДН Ua
Установить Uun=0
Запустить отсчет времени tp, мс
Получить с ДТ Ia
Rdchar=Ua/-Ia
Получить с ДН Ua
Да
Ua=0
Нет
Остановить отсчет времени, зафиксировать tp, мс
CAPnycm=0.0001*tp/Rdchar
e0=8.85*10^-12
Sact=Id*CAPnycm/e0*100057
Установить частоту F=100*dF
Установить Uun=0
Установить частоту F=100*dF
j=0
Получить Ia с ДТ
Ожидание 1 сек.
j=j+1
Да
Ia=0
Нет
Увеличить на 1 шаг напряжение Uun
Да
j=3
Нет
Сохранить в ПЗУ Iub=Ia
Нет
Uun=Umxapp
Да
Сохранить в ПЗУ Iub=0
Создать массив Ia10[10]
Iav=0
i=1 до 10
Получить Ia с ДАн
Ia10[i]=Ia
Iav=Iav+Ia
Ожидание 3 сек.
Iav=Iav/10
i=1 до 10
Dspla10=Dspla10+(Ia10[i]-Iav)^2
Sia=√Dspla10/9
Сохранить в ПЗУ Sia

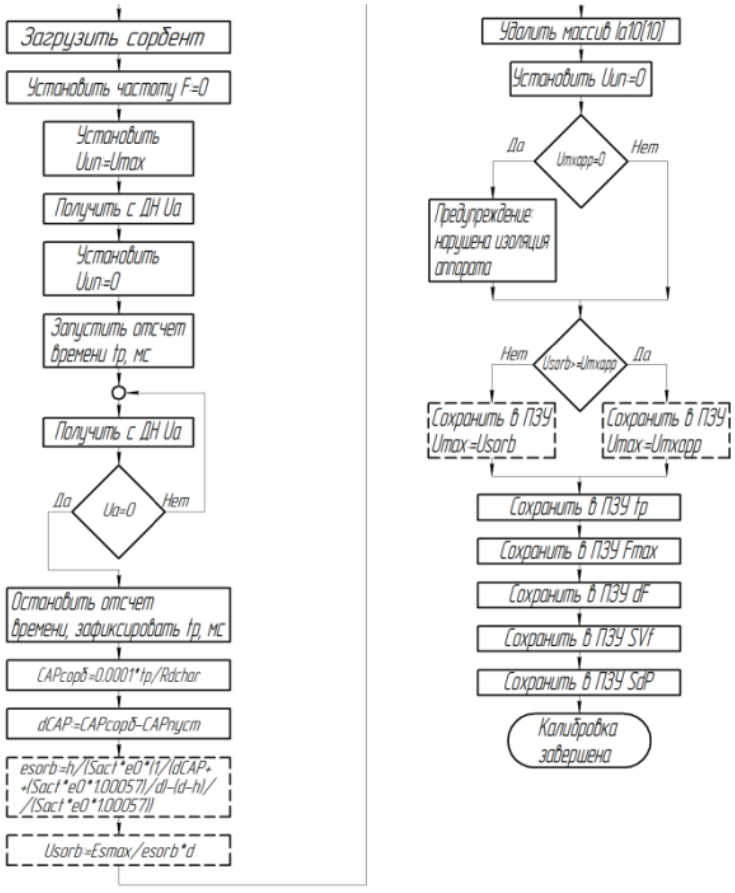


Рис. 2. Алгоритм автоматизированной калибровки технологических параметров электроадсорбционных аппаратов селективной очистки газовых выбросов

После чего вычисляет среднеквадратическое отклонение *SVf* скорости фильтрации и среднеквадратическое отклонение разности давлений в нижнем и верхнем патрубках массообменного аппарата, а также между витками и секциями аппарата *SdP*.

На следующем этапе программа переходит к снятию фильтрационной кривой газораспределительных решеток массообменного аппарата. В программе она представляет собой значения разности давлений, определенные при изменении скорости газового потока с шагом 1 %. При каждой итерации цикла программа ожидает установления постоянной скорости потока с помощью цикла ожидания (развернутая версия алгоритма программы калибровки представлена на рис. 2).

После анализа и адаптации гидродинамических составляющих программа переходит к калибровке параметров электрического поля. При выборе диапазонов регулирования параметров электрического поля (напряженности) учитываются паспортные расчетные характеристики [1]. Однако осуществлять автокалибровку параметров электрического поля и последующее гибкое автоматическое управление режимами электроадсорбционных аппаратов предполагается за счет методики распознавания «ионного ветра». «Ионный ветер» возникает вследствие движения ионизированных молекул газа под действием электрического поля высокой напряженности и, вследствие соударений, вовлечения в движение и неионизированных молекул. Это приводит к резкой активизации поглощения из газов извлекаемых компонентов твердыми сорбентами [1], что позволяет существенно снизить напряженность электрического поля по сравнению с номинальной, без потери

качества улавливания из газов извлекаемых компонентов и степени насыщаемости адсорбентов. Рассмотрим принцип и алгоритм калибровки параметров электрического поля с учетом автоматизированного регулирования напряженности электрического поля и распознавания «ионного ветра». Поскольку «ионный ветер» представляет собой движение ионов газа между заряженными поверхностями, о его возникновении можно судить по нарастанию тока в цепи источника напряжения, сообщающего заряд винтовым поверхностям электроадсорбционного массообменного аппарата. Для этого в цепи электропитания аппарата имеется датчик тока на эффекте Холла.

На первом этапе программа проверяет, может ли изоляция аппарата выдержать максимальное напряжение источника питания, а если нет, то определяет максимальное напряжение и одновременно проверяет качество изоляции массообменного сорбционного аппарата. Сначала программа останавливает воздуходувку и делает контрольную установку напряжения источника питания в ноль. Затем по командам программы источник питания пошагово увеличивает напряжение, пока в цепи питания аппарата не появится ток. После его появления программа дает команду источнику питания уменьшить напряжение на 1 шаг и фиксирует уставку напряжения источника в специальной переменной *Umxapp* (максимальное напряжение массообменного аппарата). Таким образом, в переменной *Umxapp* оказывается максимальное значение уставки напряжения источника питания, при котором ток в цепи аппарата еще не появляется, либо максимальное напряжение, которое может выдать источник питания.

После чего программа переходит к определению электрическим путем активной площади перекрытия решеток. Поскольку решетки массообменного аппарата непрерывного действия [21] можно рассматривать как плоский конденсатор, аппарат обладает определенной электрической емкостью, которая пропорциональна площади взаимной проекции решеток друг на друга. Для этого программа получает с датчика напряжения *ДН* значение мгновенного напряжения между решетками аппарата, а затем дает команду источнику питания отключить напряжение, что вызывает срабатывание цепи разряда, и электрическая емкость аппарата начинает разряжаться через датчик тока *ДТ* и разрядное сопротивление *Rdchar*. Программа получает с датчика напряжения *ДН* текущие значения, затем выдает команду отключить напряжение источника и запускает отсчет времени по системному таймеру контроллера в миллисекундах. После этого программа получает с датчика тока *ДТ* мгновенное значение тока в цепи, далее рассчитывает величину полного сопротивления цепи разряда *Rdchar*. Поскольку ток течет от аппарата, по датчику его значение будет отрицательным, поэтому в расчетную формулу введен знак минус.

Затем программа входит в цикл, в котором проверяет, достигло ли напряжение между решетками аппарата нуля. Цикл выполняется непрерывно, пока аппарат не разрядится. После чего программа останавливает отсчет времени и сохраняет получившееся время в переменной *tp*. На следующем шаге программа рассчитывает электрическую емкость аппарата. Расчетная формула емкости аппарата получена из формулы

$$U_{\text{кон}} = U_{\text{нач}} \text{e}^{\frac{-0{,}001tp}{RC}}, \tag{1}$$

где $U_{\text{кон}}$, $U_{\text{нач}}$ – соответственно остаточное и исходное напряжения на конденсаторе, *В*; *tp* – время разряда, мс; *R* – сопротивление цепи разряда, Ом; *C* – электрическая емкость плоского конденсатора, Ф.

Если принять $U_{\text{кон}} = 0{,}0001U_{\text{нач}}$, после преобразования получим

$$C = \frac{0{,}0001tp}{R} \tag{2}$$

или в обозначениях, принятых в алгоритме:

$$CAP_{\text{пуст}} = \frac{0{,}0001tp}{Rdchar}. \quad (3)$$

Далее программа присваивает переменной значение электрической постоянной и переходит к расчету активной площади винтовых решеток аппарата. Расчетная формула активной площади получена из выражения

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}, \quad (4)$$

где ε = 1,00057 – относительная диэлектрическая проницаемость воздуха; $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; S – площадь взаимной проекции пластин конденсатора, м^2; d – расстояние между витками аппарата (пластинами конденсатора), м.

Выражая из формулы (4) площадь взаимной проекции пластин конденсатора, получим

$$S = \frac{dC}{\varepsilon\varepsilon_0}, \quad (5)$$

После определения активной площади массообменного аппарата программа инициирует загрузку сорбента в аппарат при максимальном рабочем расходе сплошной газовой фазы. Затем программа выдает команду на выключение воздуходувки и на включение источника питания на ранее определенное напряжение *U*max, после чего представленным способом, используя формулу (2), определяет электрическую емкость аппарата, заполненного сорбентом.

Далее программа переходит к определению на основе полученных результатов измерений относительной диэлектрической проницаемости сорбента. Поскольку относительная диэлектрическая проницаемость среды указывает, во сколько раз напряженность электрического поля в среде меньше, чем в вакууме, для определения напряжения на решетках, соответствующего максимально допустимой напряженности электрического поля в сорбенте, ее нахождение необходимо. В основе метода определения относительной диэлектрической проницаемости сорбента положен принцип разности электрической емкости аппарата с загруженным сорбентом и пустого. Программа определяет разность *dCAP* или (ΔC), а затем рассчитывает относительную диэлектрическую проницаемость сорбента. Расчетная формула получена из формулы расчета плоского конденсатора с несколькими слоями различных диэлектриков между обкладками. Расчетная схема представлена на рис. 3.

Такой конденсатор можно рассматривать как два последовательно соединенных конденсатора с различными диэлектриками. Тогда выражение для разности емкостей ΔC пустого аппарата $C_{\text{пуст}}$ и аппарата, загруженного сорбентом $C_{\text{сорб}}$, Ф, будет иметь вид

$$\Delta C = C_{\text{пуст}} - C_{\text{сорб}} = \left(\frac{d-h}{\varepsilon_{\text{в}}\varepsilon_0 S} - \frac{h}{\varepsilon_{\text{с}}\varepsilon_0 S} \right)^{-1} - \frac{\varepsilon_{\text{в}}\varepsilon_0 S}{d}, \quad (6)$$

где h – высота слоя сорбента, ограничиваемая радиальными перегородками, м; $\varepsilon_{\text{в}}$, $\varepsilon_{\text{с}}$ – относительные диэлектрические проницаемости воздуха и сорбента соответственно, $\varepsilon_{\text{в}}$ = 1,00057; S – активная площадь решеток аппарата, м^2.

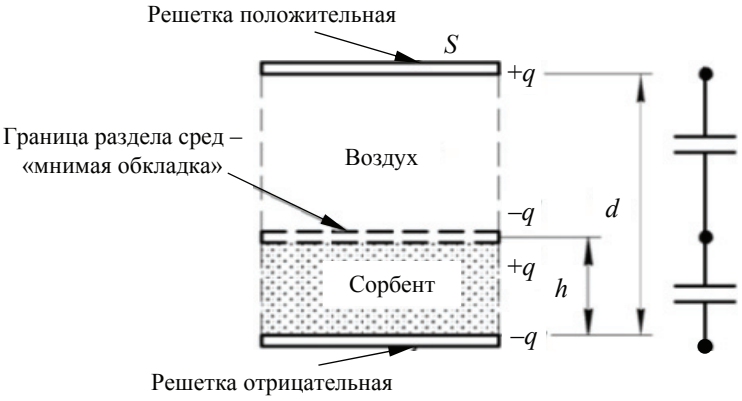


Рис. 3. Расчетная схема с несколькими слоями различных диэлектриков между обкладками

Преобразуя выражение относительно ε_c, получим

$$\varepsilon_c = \frac{h}{S\varepsilon_0\left(\dfrac{1}{\Delta C + \dfrac{S\varepsilon_0\varepsilon_в}{d}} - \dfrac{d-h}{S\varepsilon_0\varepsilon_в}\right)}. \quad (7)$$

Приведенная расчетная формула включена в программу. Далее программа рассчитывает, при каком напряжении между решетками электроадсорбера в слое сорбента создается электрическое поле с напряженностью *Es*max, то есть, максимально допустимой напряженностью электрического поля для адсорбента.

Следующим этапом программа переходит к определению тока «ионного ветра», то есть минимально определяемого тока, возникающего в результате движения ионов воздуха (газа) от одной винтовой решетки адсорбера к другой под действием электрического поля. Поскольку принудительное движение воздуха (газа) в массообменном аппарате способно ускорить перенос ионов, программа, выдав контрольную команду отключить питание массообменного аппарата, дает команду включить воздуходувку на максимальную частоту вращения, соответствующую максимальному рабочему расходу газового потока. Затем проводит действия, аналогичные тем, которые осуществлялись для определения максимального напряжения, которое способен выдержать массообменный аппарат. Программа увеличивает напряжение, подаваемое на аппарат, до тех пор, пока с датчика тока *ДТ* не появится сигнал, отличный от нуля. После чего проводит три считывания данных с датчика тока с интервалом в одну секунду. Если после третьего считывания ток не исчез, программа сохраняет в ПЗУ его значение как значение тока «ионного ветра» *I*ив. Если напряжение источника питания дошло до максимального, а ток так и не появился, программа присваивает переменной *I*ив значение 0 и сохраняет его в ПЗУ.

Далее программа переходит к определению среднеквадратического отклонения определения тока в цепи массообменного аппарата. Принцип определения среднеквадратического отклонения показаний датчика тока такой же, как и других датчиков. Программа, оставляя напряжение и скорость газового потока, соответствующие наличию тока в цепи аппарата, создает массив из 10 элементов, после чего входит в цикл, где с периодичностью в три секунды получает показания датчика тока и сохраняет их в массиве, а также суммирует данные показания в переменной *Iav*.

После 10 итераций программа делит число из переменной *Iav* на число циклов и получает среднее значение тока в цепи. Затем программа входит в цикл, где определяет дисперсию показаний датчика тока, а на следующем шаге рассчитывает среднеквадратическое отклонение и сохраняет в ПЗУ как переменную *SIa*.

Далее программа удаляет массив и отключает подачу напряжения на массообменный аппарат. Затем проверяет, равняется ли определенное максимальное напряжение, которое выдерживает аппарат, нулю, и, если равняется, выдает предупреждение о нарушении изоляции аппарата. После чего программа проверяет, является ли напряжение, соответствующее максимально допустимой для сорбента напряженности электрического поля, большим либо равным максимальному напряжению, которое способна выдерживать изоляция аппарата. Если является, в качестве верхнего предела напряжения в ПЗУ сохраняется максимальное напряжение для массообменного аппарата, в противном случае – максимальное напряжение для сорбента.

Затем программа сохраняет в ПЗУ найденные в ходе калибровки технологические параметры электроадсорбционного аппарата. На этом процесс калибровки завершается.

Заключение

Разработана система автоматической калибровки технологических параметров и самоадаптивного гибкого регулирования режимов работы электроадсорбционных массообменных аппаратов очистки газовых выбросов, которая базируется на распознавании оптимальных гидродинамических условий протекания массообменных сорбционных процессов, сопутствующих активному омыванию поверхностей адсорбентов сплошным газовым потоком, а также оптимизации параметров напряженности электрического поля с учетом «ионного ветра», что приводит к существенной интенсификации массообменных процессов, повышает степень улавливания извлекаемых из газа компонентов (особенно в условиях сверхмалых концентраций извлекаемых вредных веществ), снижает внутридиффузионное сопротивление адсорбентов, увеличивает емкость сорбентов, продлевает время защитного действия адсорбентов в условиях энергосбережения при осуществлении работы электроадсорбционных установок.

Программы калибровки технологических параметров и управления электросорбционными процессами позволят добиться наивысших показателей работы и степеней очистки газовых выбросов для широкого спектра конструкций массообменных аппаратов с учетом сложнейших особенностей конкретного массообменного технологического процесса и особенно актуальны в условиях улавливания сверхмалых концентраций извлекаемых из газов вредных компонентов (веществ), что часто встречается в экологических процессах и является насущной проблемой.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых-кандидатов наук МК-1287.2020.8 «Моделирование процессов управления в массообменном экологическом и нефтегазоперерабатывающем оборудовании».

Список литературы

1. Голованчиков, А. Б. Интенсификация массообменных процессов в электрическом поле : монография / А. Б. Голованчиков, М. Ю. Ефремов, Н. А. Дулькина. – Волгоград : ВолгГТУ, 2011. – 152 с.

2. Голованчиков, А. Б. Моделирование сорбционных процессов с учетом структуры потока : монография / А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, Н. А. Меренцов. – Волгоград : ВолгГТУ, 2018. – 128 с.

3. Nikolaeva, L. Purification of Gas Emissions of Chemical Industry Enterprises by Carbonaceous Cutting / L. Nikolaeva, A. Khusnutdinov // Ecology and Industry of Russia. – 2018. – Vol. 22, No. 8. – P. 14 – 18.

4. Голованчиков, А. Б. Уравнение фильтрации для насадочных контактных устройств / А. Б. Голованчиков, В. А. Балашов, Н. А. Меренцов // Хим. и нефтегазовое машиностроение. – 2017. – № 1. – С. 8 – 10.

5. Research Dispersing Liquid and Gas in the Contact Device with an Increased Range of Stable Operation / A. V. Dmitriev, I. N. Madyshev, O. S. Dmitrieva, A. N. Nikolaev // Ecology and Industry of Russia. – 2017. – Vol. 21, No. 3. – P. 12 – 15.

6. Авторежимные насадочные колонны для пульсационной жидкостной экстракции / Н. А. Меренцов, А. В. Персидский, М. В. Топилин, А. Б. Голованчиков // Экологические системы и приборы. – 2020. – № 3. – С. 3 – 14. doi: 10.25791/esip.03.2020.1140

7. Меренцов, Н. А. Моделирование тепломассообменных насадочных устройств с развитым капельным режимом течения : монография / Н. А. Меренцов, А. Б. Голованчиков, В. А. Балашов. – Волгоград : ВолгГТУ, 2019. – 140 с.

8. Сергунин, А. С. Исследование динамики адсорбции и десорбции паров воды активным оксидом алюминия и цеолитом Nax / А. С. Сергунин, С. И. Симаненков, Н. Ц. Гатапова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 3. – С. 664 – 671.

9. Автоматизация процесса адсорбционного разделения газовых смесей и получения водорода / В. Г. Матвейкин, А. А. Ишин, С. А. Скворцов, С. И. Дворецкий // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 548 – 556. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.548-556

10. Адсорбция в колонне непрерывного действия с диффузионной структурой потока по газовой фазе / А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, Н. А. Меренцов, А. А. Коберник // Экологические системы и приборы. – 2016. – № 2. – С. 23 – 31.

11. Dmitriev, A. V. Cleaning of Industrial Gases from Aerosol Particles in Apparatus with Jet-Film Interaction of Phases / A. V. Dmitriev, I. N. Madyshev, O. S. Dmitrieva // Ecology and Industry of Russia. – 2018. – Vol. 22, No. 6. – P. 10 – 14.

12. Golovanchikov, A. B. Modeling of Adsorption Process in Continuous Counter Current Column Having Diffused Flow Structure in Gaseous Phase / A. B. Golovanchikov, N. A. Merentsov, M. V. Topilin // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1278. – P. 012023.

13. Рухов, А. В. Математическое моделирование процессов адсорбции ионов кобальта Co^{2+} активированными углями, модифицированными углеродными нанотрубками / А. В. Рухов, И. В. Романцова, Е. Н. Туголуков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 2. – С. 360 – 367.

14. Golovanchikov, A. B. Ion Exchange in Continuous Apparatus with Diffused Flow Structure in Liquid / A. B. Golovanchikov, N. A. Merentsov // Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer, 2019. – Vol. 983. – P. 645 – 652.

15. Моделирование ионообмена в аппарате непрерывного действия с диффузионной структурой потока по жидкости / А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, Н. А. Меренцов, А. А. Коберник // Экологические системы и приборы. – 2015. – № 10. – С. 15 – 23.

16. Modelling and Calculation of Industrial Absorber Equipped with Adjustable Sectioned Mass Exchange Packing / N. A. Merentsov, A. V. Persidskiy, V. N. Lebedev [et al.] // Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer, 2019. – Vol. 983. – P. 560 – 573.

17. Автоматическое управление режимами работы насадочных аппаратов селективной очистки газовых выбросов / Н. А. Меренцов, А. В. Персидский, В. Н. Лебедев, А. Б. Голованчиков // Экология и промышленность России. – 2020. – Т. 24, № 2. – С. 10 – 16.

18. Golovanchikov, A. B. Modelling of Absorption Process in a Column with Diffused Flow Structure in Liquid Phase / A. B. Golovanchikov, N. A. Merentsov // Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer, 2019. – Vol. 983. – P. 635 – 644.

19. Перспективы использования промышленных отходов машиностроительных предприятий для решения экологических проблем строительной отрасли / Н. А. Меренцов, А. В. Персидский, В. Н. Лебедев [и др.] // Вестн. ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура. – 2019. – № 4 (77). – С. 182 – 195.

20. Ломовцева, Е. Е. О пористой структуре гибридных сорбирующих материалов для осушки воздуха / Е. Е. Ломовцева, М. А. Ульянова, Н. Ц. Гатапова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 2. – С. 299 – 305.

21. Mass Transfer Apparatus for a Wide Range of Environmental Processes / N. A. Merentsov, A. B. Golovanchikov, M. V. Topilin [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1399. – P. 055028.

22. Оценка интенсивности развития турбулизации в тепломассообменных насадочных контактных устройствах для селективной очистки газовых выбросов и испарительного охлаждения промышленной оборотной воды / Н. А. Меренцов, А. Б. Голованчиков, В. А. Балашов [и др.] // Вестн. ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура. – 2020. – Т. 79, № 2. – С. 245 – 254.

The Automated Calibration System for Process Parameters of Electric Adsorption Devices for Selective Purification of Gas Emissions

N. A. Merentsov[1], A. V. Persidskiy[2], M. V. Topilin[3], A. B. Golovanchikov[1]

Department of Processes and Equipment for Chemical and Food Industries, steeple@mail.ru; Volgograd State Technical University (1); JSC "Federal Research and Production Center "Titan-Barricades"(2); LLC LUKOIL-Engineering VolgogradNIPImorneft (3), Volgograd, Russia

Keywords: adsorption; gas emissions; mass transfer; selective gas cleaning; sorbent; sorption; filtration currents; electric adsorption.

Abstract: The procedure for automatic calibration of process parameters of electric adsorption mass transfer devices for selective purification of gas emissions is presented on the example of a continuous electric adsorber with a moving adsorbent bed. The calibration program is based on automatic recognition of the ranges of regulation of the operating modes of electric sorption devices at the stage of commissioning or during the current operation of technological mass transfer equipment. The hydrodynamics of the filtration flow through the adsorbent bed and the parameters of the electric field are subject to calibration, while the optimal filtration regimes from the point of view of washing the adsorbent granules with a continuous gas phase flow are recognized. Determination of the control limits for the parameters of the electric field is based on an automatic check of the quality of electrical insulation part of the mass transfer device, as well as recognition of the current arising in the circuit when ions move between charged surfaces (ionic wind). The calibration program and the

parameters obtained with its help will enable the self-adaptive system of automated control of electrical adsorption processes to achieve the highest rates of purification of gas emissions, with optimal energy costs for the implementation of mass transfer processes and will provide an opportunity to smooth out technological, large-scale and other factors inherent in specific mass transfer processes and device designs.

References

1. Golovanchikov A.B., Yefremov M.Yu., Dul'kina N.A. *Intensifikatsiya massoobmennykh protsessov v elek-tricheskom pole: monografiya* [Intensification of mass transfer processes in an electric field: monograph], Volgograd: VolgGTU, 2011, 152 p. (In Russ.)

2. Golovanchikov A.B., Zalipayeva O.A., Merentsov N.A. *Modelirovaniye sorbtsionnykh protsessov s uchetom struktury potoka: monografiya* [Modeling of sorption processes taking into account the flow structure: monograph], Volgograd: VolgGTU, 2018, 128 p. (In Russ.)

3. Nikolaeva L., Khusnutdinov A. Purification of Gas Emissions of Chemical Industry Enterprises by Carbonaceous Cutting, *Ecology and Industry of Russia*, 2018, vol. 22, no. 8, pp. 14-18.

4. Golovanchikov A.B., Balashov V.A., Merentsov N.A. [Filtration equation for packed contact devices], *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2017, no. 1, pp. 8-10. (In Russ.)

5. Dmitriev A.V., Madyshev I.N., Dmitrieva O.S., Nikolaev A.N. Research Dispersing Liquid and Gas in the Contact Device with an Increased Range of Stable Operation, *Ecology and Industry of Russia*, 2017, vol. 21, no. 3, pp. 12-15.

6. Merentsov N.A., Persidskiy A.V., Topilin M.V., Golovanchikov A.B. [Auto-mode packed columns for pulsating liquid extraction], *Ekologicheskiye sistemy i pribory* [Ecological systems and devices], 2020, no. 3, pp. 3-14, doi: 10.25791/esip.03.2020.1140 (In Russ., abstract in Eng.)

7. Merentsov N.A., Golovanchikov A.B., Balashov V.A. *Modelirovaniye teplomassoobmennykh nasadochnykh ustroystv s razvitym kapel'nym rezhimom techeniya: monografiya* [Modeling of heat and mass transfer packed devices with a developed drip flow regime: monograph], Volgograd: VolgGTU, 2019, 140 p. (In Russ.)

8. Sergunin A.S., Simanenkov S.I., Gatapova N.Ts. [Study of the dynamics of adsorption and desorption of water vapor by active aluminum oxide and zeolite NAX], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 3, pp. 664-671. (In Russ., abstract in Eng.)

9. Matveykin V.G., Ishin A.A., Skvortsov S.A., Dvoretskiy S.I. [Automation of the process of adsorption separation of gas mixtures and hydrogen production], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 548-556, doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.548-556 (In Russ., abstract in Eng.)

10. Golovanchikov A.B., Zalipayeva O.A., Merentsov N.A., Kobernik A.A. [Adsorption in a continuous column with a diffusion structure of the flow in the gas phase], *Ekologicheskiye sistemy i pribory* [Ecological systems and devices], 2016, no. 2, pp. 23-31. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Dmitriev A.V., Madyshev I.N., Dmitrieva O.S. Cleaning of Industrial Gases from Aerosol Particles in Apparatus with Jet-Film Interaction of Phases, *Ecology and Industry of Russia*, 2018, vol. 22, no. 6, pp. 10-14.

12. Golovanchikov A.B., Merentsov N.A., Topilin M.V. Modeling of Adsorption Process in Continuous Counter Current Column Having Diffused Flow Structure in Gaseous Phase, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1278, p. 012023.

13. Rukhov A.V., Romantsova I.V., Tugolukov Ye.N. [Mathematical modeling of the adsorption of cobalt ions by CO^{2+} activated carbons modified with carbon

nanotubes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 2, pp. 360-367. (In Russ., abstract in Eng.)

14. Golovanchikov A.B., Merentsov N.A. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, 2019, vol. 983, pp. 645-652.

15. Golovanchikov A.B., Zalipayeva O.A., Merentsov N.A., Kobernik A.A. [Modeling of ion exchange in a continuous apparatus with a diffusion structure of the flow through liquid], *Ekologicheskiye sistemy i pribory* [Ecological systems and devices], 2015, no. 10, pp. 15-23. (In Russ., abstract in Eng.)

16. Merentsov N.A., Persidskiy A.V., Lebedev V.N., Topilin M.V., Golovanchikov A.B. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, 2019, vol. 983, pp. 560-573.

17. Merentsov N.A., Persidskiy A.V., Lebedev V.N., Golovanchikov A.B. [Automatic control of the modes of operation of the nozzles selective cleaning of gas emissions], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2020, vol. 24, no. 2, pp. 10-16. (In Russ.)

18. Golovanchikov A.B., Merentsov N.A. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, 2019, vol. 983, pp. 635-644.

19. Merentsov N.A., Persidskiy A.V., Lebedev V.N., Karasev A.G., Golovanchikov A.B. [Prospects for the use of industrial waste from machine-building enterprises for solving environmental problems of the construction industry], *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Building and architecture], 2019, no. 4 (77), pp. 182-195. (In Russ., abstract in Eng.)

20. Lomovtseva Ye.Ye., Ul'yanova M.A., Gatapova N.Ts. [On the porous structure of hybrid sorbent materials for air drying], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 2, pp. 299-305. (In Russ., abstract in Eng.)

21. Merentsov N.A., Golovanchikov A.B., Topilin M.V., Persidskiy A.V., Tezikov D.A. Mass Transfer Apparatus for a Wide Range of Environmental Processes, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1399, p. 055028.

22. Merentsov N.A., Golovanchikov A.B., Balashov V.A., Lebedev V.N., Persidskiy A.V. [Assessment of the intensity of turbulization development in heat and mass transfer packed contact devices for selective purification of gas emissions and evaporative cooling of industrial circulating water], *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Building and architecture], 2020, vol. 79, no. 2, pp. 245-254. (In Russ., abstract in Eng.)

Automatisiertes Kalibriersystem für technologische Parameter der elektrischen Adsorptionsgeräte für selektive Reinigung von Gasemissionen

Zusammenfassung: Das Schema der automatischen Kalibrierung technologischer Parameter der elektrischen Adsorptionsmassentransfervorrichtungen zur selektiven Reinigung von Gasemissionen ist am Beispiel eines kontinuierlichen elektrischen Adsorbers mit einer beweglichen Adsorbensschicht vorgestellt. Das Kalibrierungsprogramm basiert auf der automatischen Erkennung der Regelungsbereiche der Betriebsarten von Elektrosorptionsgeräten in der Phase der Inbetriebnahme oder während des aktuellen Betriebs von technologischen Stoffübergangsgeräten. Die Hydrodynamik des Filtrationsflusses durch die Adsorbensschicht und die Parameter des elektrischen Feldes unterliegen einer Kalibrierung, dabei werden optimale Filtrationsmodi hinsichtlich des Waschens

des Adsorbensgranulats mit einem kontinuierlichen Gasphasenfluss festgestellt; und die Bestimmung der Kontrollgrenzen für die Parameter des elektrischen Feldes basiert auf der automatischen Überprüfung der Qualität der Isolierung des elektrischen Teils des Stoffübergangsgerätes sowie auch auf der Erkennung des im elektrischen Netz entstehenden Stroms, wenn sich Ionen zwischen geladenen Oberflächen bewegen (Ionenwind). Das Kalibrierungsprogramm und die mit seiner Hilfe erhaltenen Parameter ermöglichen dem selbstadaptiven System der automatisierten Steuerung von Elektrodesorptionsprozessen, die höchsten Werte für die Reinigung von Gasemissionen bei optimalen Energiekosten für die Implementierung von Stoffaustauschprozessen zu erzielen, und bieten die Möglichkeit, technologische, großangelegte und andere Faktoren zu glätten, die bestimmten Stoffaustauschprozessen und Gerätekonstruktionen eigen sind.

Système du calibrage automatisé des paramètres des appareils d'électroadsorption du traitement sélectif des émissions de gaz

Résumé: Est présenté le schéma du calibrage automatique des paramètres technologiques des appareils d'échange de masse d'électroadsorption pour la purification sélective des émissions de gaz à l'exemple d'un électroadsorbeur à action continue avec une couche mobile d'adsorbant. Le programme du calibrage est basé sur la reconnaissance automatique des plages de réglage des modes du fonctionnement des appareils d'électroadsorption au stade de la mise en service ou dans le fonctionnement actuel de l'équipement d'échange de masse technologique. Au calibrage est soumis l'hydrodynamique de l'écoulement de filtration à travers une couche d'adsorbant et les paramètres du champ électrique; sont reconnus les régimes optimaux de filtration. Le programme du calibrage et les paramètres obtenus permettent au système autoadaptés automatisés de gestion des processus d'adsorption d'atteindre des taux les plus élevés des degrés du raffinage des gaz et donne la possibilité de niveler les facteurs technologiques, à grande échelle et d'autres, propres au processus du transfert de masse et de la conception des appareils.

Авторы: ***Меренцов Николай Анатольевич*** – кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»; ***Персидский Александр Владимирович*** – ведущий инженер-конструктор АО «Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады»; ***Топилин Михаил Владимирович*** – инженер 2-й категории лаборатории стандартных исследований керна ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг ВолгоградНИПИморнефть»; ***Голованчиков Александр Борисович*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Россия.

Рецензент: ***Гатапова Наталья Цибиковна*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

УДК 621.396.96
DOI: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.388-392

ОСОБЕННОСТИ ОПИСАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРАХ ВРЕМЕННЫХ СООТНОШЕНИЙ

Е. И. Алгазин

Кафедра «Электроника и электротехника», evgeniialgazin@gmail.com;
ФГОБУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»,
г. Новосибирск, Россия

Ключевые слова: временные соотношения; комплексная плоскость; электрическая цепь.

Аннотация: Наиболее часто используется структура времени в виде вещественного числа, позволяющего представлять времязависимые процессы в виде аналитических выражений, дающих возможность анализировать исследуемые параметры данных процессов. Однако автором сделаны допущения о неединственности структуры времени, с учетом которой проведены оценки состояния параметров, характеризующих такие процессы.

Введение

В теории дифференциальных уравнений в ряде случаев используются известное комплексное представление времени для получения аналитических выражений [1, с. 284], однако, в области значений, соответствующей электротехнике, применяется впервые. Кроме того, в исследуемом случае, когда $\tau = -\frac{1}{p}$ и корень характеристического уравнения комплексный, возможно появление комплексного τ. В дальнейшем это учитывается при оценке напряжения на конденсаторе U_c в виде затухающей экспоненты с комплексными показателями. При этом часть решения соответствует мнимой части параметра напряжения на конденсаторе. Формально нельзя вмешаться в мнимую часть решения, однако, реализовать в виде фрагмента технического устройства, для оценки процессов в цепи, возможно. При этом можно менять характеристики такого фрагмента, но создать датчик мнимого времени на сегодняшний день затруднительно.

Постановка задачи

Пусть задана линейная электрическая цепь R–C–L–0 в виде последовательного соединения следующих элементов: R – резистор, обладающий сопротивлением R; C – конденсатор, обладающий емкостью C; L – катушка, обладающая индуктивностью L.

Конденсатор предварительно заряжен до напряжения U_0. В цепи происходит разряд конденсатора. Номиналы элементов цепи подобраны таким образом, чтобы обеспечить колебательный разряд, при этом корни характеристического уравнения являются комплексно-сопряженными.

Элементы цепи являются сосредоточенными линейными элементами. Кроме того, приняты следующие допущения:

– конденсатор не имеет токов утечки.

– катушка индуктивности не имеет межвитковых емкостей.

Необходимо, задавшись нижеописанными структурами времени, оценить колебательный процесс в виде аналитических выражений для напряжения на конденсаторе.

Пути решения

В работе [2] несмотря на то, что корни, указывающие на колебательный режим исследуемой цепи, комплексно-сопряжены, и им соответствуют формально комплексно-сопряженные постоянные времени цепи, анализ величины напряжения на конденсаторе U_c ведется в области вещественного времени.

Рассмотрим структуру времени и введем комплексное время, состоящее из вещественной и мнимой частей, а также чисто мнимое время, состоящее только из мнимой части.

С учетом такого введения получим аналитическое выражение $U_c(t)$ и проведем анализ всех трех структур времени.

На основании такого анализа выявим особенности поведения исследуемой R–C–L–0 цепи.

В общем виде $U_c(t)$ имеет следующее аналитическое выражение:

$$U_c(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t},$$

где $U_c(t)$ – мгновенное значение напряжения на конденсаторе; A_1, A_2 – постоянные интегрирования; p_1, p_2 – комплексно-сопряженные корни.

Найдем A_1 и A_2:

при $t = 0$:

$$U_c(0) = A_1 + A_2 = U_0;$$

$$i_c(t) = C\frac{dU_c}{dt} = CA_1 p_1 e^{p_1 t} + CA_2 p_2 e^{p_2 t},$$

где $i_c(t)$ – ток конденсатора в цепи;

$$i_c(0) = CA_1 p_1 = CA_2 p_2 = 0,$$

откуда:

$$A_1 = U_0 - A_2,\ A_2 = U_0 - A_1,$$

далее:

$$CA_1 p_1 + C(U_0 - A_1)p_2 = 0;$$

$$CA_1 p_1 + CU_0 p_2 - CA_1 p_2 = 0.$$

Сократим сомножитель C и, проведя преобразование, получим:

$$A_1 = -\frac{U_0 p_2}{p_1 - p_2};$$

$$A_2 = -\frac{U_0 p_1}{p_1 - p_2}.$$

Зная, что $p_1 = \alpha + j\beta$, $p_2 = \alpha - j\beta$, где α, β – соответственно вещественная и мнимая части корня, детализируем A_1 и A_2:

$$A_1 = -\frac{U_0(\alpha - j\beta)}{2j\beta};$$

$$A_1 = -\frac{U_0(\alpha + j\beta)}{2j\beta}.$$

Откуда:

$$A_1 + A_2 = U_0;$$

$$A_1 - A_2 = -\frac{U_0\alpha}{j\beta};$$

$$A_2 - A_1 = -\frac{U_0\alpha}{j\beta}.$$

Пусть время описывается вещественной переменной t. Тогда получим

$$U_c(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} = (A_1 + A_2)\, e^{-\alpha t} \cos(\beta t) + j(A_1 - A_2)\, e^{-\alpha t} \sin(\beta t) =$$

$$= U_0 e^{-\alpha t} \cos(\beta t) - U_0 \frac{\alpha}{\beta} e^{-\alpha t} \sin(\beta t).$$

При описании времени комплексной переменной $t = jt$ имеем

$$U_c(t) = A_1 e^{(-\alpha-\beta)t} \cos(-\alpha + \beta)\, t + A_2 e^{(-\alpha+\beta)t} \cos(-\alpha - \beta)\, t +$$

$$+ jA_1 e^{(-\alpha-\beta)t} \sin(-\alpha + \beta)\, t + jA_2 e^{(-\alpha+\beta)t} \sin(-\alpha - \beta)\, t.$$

При описании времени чисто мнимой переменной jt имеем

$$U_c(t) = \frac{U_0}{2}\left(e^{-\beta t} + e^{\beta t}\right)\cos(\alpha t) + \frac{U_0\alpha}{2\beta}\left(e^{-\beta t} - e^{\beta t}\right)\sin(\alpha t) +$$

$$+ j\left[\frac{U_0\alpha}{2\beta}\left(e^{-\beta t} - e^{\beta t}\right)\cos(\alpha t) - \frac{U_0}{2}\left(e^{-\beta t} + e^{\beta t}\right)\sin(\alpha t)\right].$$

Результаты

В результате проведенных исследований выяснено, что при различных структурах времени существует описание исследуемых параметров (в нашем случае напряжения на конденсаторе U_c) как в реальной, так и мнимой частях описания анализируемой схемы.

С точки зрения методологии исследования электрических цепей это представляет собой несомненный интерес. Исследования колебательного режима для всех структур времени проведены впервые и указывают на то, что в настоящее время все цепи рассчитываются в области вещественной составляющей времени, полагая мнимую составляющую равной нулю, а также позволяют оценить как вещественную, так и мнимую составляющие напряжения на конденсаторе.

Выводы

Установлено, что структура времени может быть вещественной, комплексной, мнимой.

Описание исследуемого параметра U_c в реальной и мнимой частях исчерпывающее. При появлении мнимой части времени появляется мнимая часть описания исследуемого параметра U_c.

Невозможно сказать, что мнимая часть времени обуславливает наличие мнимой части U_c. (В нашем случае R–C–L–0 цепи), и наоборот, мнимая U_c обуславливает наличие мнимой части времени. Таким образом, мнимое время и мнимая составляющая U_c являются взаимосвязанными понятиями.

Приоритет в смысле времени обусловлен вещественной частью описания исследуемого параметра U_c. Это следует из того, что в момент $t = 0$ существует напряжение U_0 в вещественной части U_c, а его мнимая часть равна нулю.

Представленный метод анализа линейных электронных цепей является дополнением и расширением существующих методов.

Список литературы

1. Арнольд, В. И. Дополнительные главы теории обыкновенных дифференциальных уравнений / В. И. Арнольд. – М. : Наука, 1978. – 304 с.

2. Веселовский, О. Н. Основы электротехники и электротехнические устройства радиоэлектронной аппаратуры : учеб. пособие для вузов / О. Н. Веселовский, Л. М. Браславский. – М. : Высш. школа, 1977 – 312 с.

Features of the Description of Linear Automation Systems with Different Time Structures

E. I. Algazin

Department of Electronics and Electrical Engineering, evgeniialgazin@gmail.com; Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Keywords: timing relationships; complex plane; electrical circuit.

Abstract: The most frequently used structure of time is the one in the form of a real number, which represents time-dependent processes in the form of analytical expressions that make it possible to analyze the studied parameters of these processes. However, the author made assumptions about the non-uniqueness of the time structure, taking into account which the estimates of the state of the parameters characterizing such processes were made.

References

1. Arnol'd V.I. *Dopolnitel'nyye glavy teorii obyknovennykh differentsial'nykh uravneniy* [Additional chapters of the theory of ordinary differential equations], Moscow: Nauka, 1978, 304 p. (In Russ.)

2. Veselovskiy O.N., Braslavskiy L.M. *Osnovy elektrotekhniki i elektrotekhnicheskiye ustroystva radioelektronnoy apparatury: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Fundamentals of electrical engineering and electrical devices of electronic equipment: a textbook for high schools], Moscow: Vysshaya shkola, 1977, 312 p. (In Russ.)

Merkmale der Beschreibung der linearen Automatisierungssysteme mit unterschiedlichen Zeitstrukturen

Zusammenfassung: Die am häufigsten verwendete Zeitstruktur ist die Form einer reellen Zahl, die es ermöglicht, zeitabhängige Prozesse in Form der analytischen Ausdrücke darzustellen, mit deren Hilfe man die untersuchten Parameter dieser Prozesse analysieren kann. Der Autor machte jedoch Annahmen über die Nicht-Eindeutigkeit der Zeitstruktur, unter Berücksichtigung derer die Bewertung des Zustandes der Parameter, die solche Prozesse charakterisieren, durchgeführt worden ist.

Particularitées de la description des systèmes linéaires d'automatisation avec de différentes structures des relations temporelles

Résumé: La structure du temps est le plus couramment utilisée sous forme du nombre réel ce qui permet de représenter les processus dépendant du temps sous la forme d'expressions analytiques qui donnent la possibilité d'analyser les paramètres étudiés de ces processus. Cependant, l'auteur expose une hypothèse que la structure temporelle n'ést pas unique en tenant compte des évaluations de l'état des paramètres caractérisant ces processus.

Автор: ***Алгазин Евгений Игоревич*** **–** доктор технических наук, профессор кафедры «Электроника и электротехника», ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, Россия.

Рецензент: ***Разинкин Владимир Павлович*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретические основы радиотехники», ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, Россия.

УДК 636.087.2
DOI: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.393-401

КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ БИОКОНВЕРСИИ ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КУЛЬТУРЫ ГРИБА *Trichoderma viride*

В. Н. Долгунин, А. В. Слепых, В. А. Пронин

Кафедра «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», a.slepix@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия

Ключевые слова: динамическое и статическое ферментирование; субстрат; твердофазная биоконверсия; целлюлозосодержащее сырье.

Аннотация: Предложена технология твердофазной биоконверсии целлюлозосодержащего сырья в барабанном аппарате с использованием культуры гриба *Trichoderma viride*. Проведено исследование кинетики процесса биоконверсии в статическом и динамическом режимах организации процесса ферментирования. Установлено, что биоконверсия в динамическом режиме обеспечивает более высокую интенсивность ферментирования с получением культуры высокой активности, позволяющей снизить продолжительность процесса более чем на 40 часов.

Отсутствие достаточных объемов отечественного качественного и недорогого органического субстрата является одним из основных препятствий для развития предприятий по производству макро- и микроскопических грибов, и в том числе грибов продовольственного назначения [1]. Как было отмечено ранее [2], наблюдаемый дефицит доступного и качественного отечественного субстрата может быть преодолен путем развития технологической базы для его производства методом твердофазного ферментирования целлюлозосодержащих производственных отходов. Это объясняется наличием в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства России большого количества органических целлюлозосодержащих отходов, являющихся перспективным сырьем для производства субстрата, богатого питательными веществами и аминокислотами. С позиции энергопотребления и экологической безопасности твердофазный ферментолиз является наиболее предпочтительным технологическим приемом биоконверсии целлюлозосодержащего сырья в органический субстрат. Кроме того важно отметить, что развитие соответствующей технологической базы обеспечит решение проблемы утилизации отходов, которая осуществляется в настоящее время экономически нецелесообразными и экологически вредными способами.

На предыдущем этапе исследования [2], при разработке технологии твердофазной биоконверсии целлюлозосодержащего сырья, осуществлен обоснованный выбор продуцента белка с высокой целлюлазной активностью и технологичного

в применении. При выборе отдано предпочтение штамму микроскопических грибов *Trichoderma viride*. Микромицет данного штамма является активным продуцентом целлюлолитического фермента, проявляет высокую целлюлазную активность на широком спектре питательных сред, вырабатывает ферменты, играющие важную роль в биодегидратации лигнина, и характеризуется высокой устойчивостью к экологическому стрессу [3].

В качестве базовой принята технология биоконверсии целлюлозосодержащего сырья, используемая для получения белкового корма, включающая подготовку сырья (отходов растениеводства), питательной среды, засев микробной культуры, твердофазную ферментацию в статическом режиме и сушку [4]. Базовая технология используется в качестве объекта для сравнительной оценки эффективности предложенной технологии, основным и по существу единственным отличием которой является организация процесса твердофазного ферментолиза в динамическом режиме. Вследствие чрезвычайной чувствительности мицелия штамма *Trichoderma viride* к механическому воздействию при проведении процесса ферментолиза в динамическом режиме взаимное перемещение элементов ферментативной среды организуют в режиме ее «мягкого» естественного обрушения на откосах. Откосы циклически формируются на открытой поверхности засыпки ферментативной среды в рабочем объеме медленно вращающегося барабана. При обрушении откоса происходит обновление поверхности контакта фаз, которое сопровождается повышением концентрации ростовых факторов в объеме ферментативной среды, ее разрыхлением и интенсификацией тепломассообменных процессов.

Для обеспечения сравнительной оценки предложенная и базовая технологии с учетом регионального акцента предполагают использование в качестве целлюлозосодержащего сырья отходов деревообработки лиственных пород. В соответствии с регламентом названных технологий используется аналогичная по составу и способу подготовки ферментативная среда. В целях повышения активности метаболизма мицелиальных грибов и, как следствие, интенсификации процесса твердофазного ферментолиза в питательную среду добавляют пшеничные отруби и солодовый экстракт. При этом первый из компонентов вводится как источник водорастворимых витаминов группы В и микроэлементов, второй – выступает как источник моносахаров, минеральных веществ и аминокислот [5]. В результате твердофазный субстрат представляет собой смесь древесных опилок, пшеничных отрубей и солодового экстракта (14 % сухих веществ), содержащихся в смеси в соотношении 3 : 2 : 2,5, соответственно. Процесс ферментолиза протекает под действием целлюлолитических ферментов, вырабатываемых культурой микроскопического гриба штамма *Trichoderma viride*. Посевная культура вводится в простерилизованный, высушенный и охлажденный стерильным воздухом субстрат в виде водной суспензии спор мицелиальных грибов с концентрацией последних 28,5 % из расчета 10 % массовых.

В соответствии с регламентом базовой технологии процесс культивирования организуют в статическом режиме, который обеспечивается путем поверхностного аэровании неподвижного слоя ферментативной среды толщиной 35 мм влажным стерильным воздухом (относительная влажность 96 – 98 %). При ферментолизе в ферментативной среде поддерживается температура 28…30 ºС, pH 4,5…6,5 и влажность 60 – 75 %. В отличие от базовой технологии в предложенном варианте ее организации культивирование осуществляется в динамическом режиме. Динамический режим реализуется при перемешивании среды «мягким» механическим воздействием гравитации в аппарате с вращающимся барабаном в условиях объемной аэрации с помощью устройства, размещенного в центре циркуляции материала в засыпке [2].

В работе [2] проведена оценка эффективности предложенного технического решения косвенным методом путем исследования относительной скорости прироста массы ферментативной среды в процессе статического и динамического ферментирования. В результате исследования установлено, что по указанному показателю интенсивность процесса в динамическом режиме его организации на 40 – 50 % выше, чем в статическом. В настоящей работе сравнительная оценка эффективности предложенного и базового вариантов организации процесса ферментолиза целлюлозосодержащего сырья проводится прямыми методами. Используемые методы обеспечивают возможность проанализировать динамику биоконверсии целлюлозы и изменения содержания лигнина в ферментативной среде, с одной стороны, и динамику наращивания биомассы и изменения содержания редуцирующих сахаров, с другой.

На очередном этапе экспериментального исследования проводился отбор образцов ферментативной среды через равные промежутки времени (24 часа) для определения концентрации протеина и содержания легкопереваривaемых сахаров для двух вариантов организации процесса. В целях минимизации влияния случайных погрешностей на результат исследования анализу подвергались пять образцов. Полученные значения после проверки на статистическую однородность при 95%-й доверительной вероятности осреднялись. В итоге, полученные результаты исследования использованы для сравнительной оценки динамики относительного прироста белковой массы и количества легкопереваривaемых сахаров в процессах динамического и статического культивирования. Для измерения концентрации протеина использовали колориметрический метод с применением биуретового реактива [6], а содержание легкопереваривaемых редуцирующих сахаров определяли йодометрическим методом [7].

На рисунке 1 представлены результаты исследования кинетики роста биомассы в виде кривых изменения концентрации протеина в ферментативной среде для вариантов ферментирования в статическом и динамическом режимах. Анализ приведенных зависимостей позволяет сделать вывод о принципиальном различии динамики процесса в названных вариантах его организации в первые двое суток его протекания. В данном периоде в статическом режиме ферментирования наблюдается относительно умеренное и постепенное возрастание концентрации белка с интенсивностью, соответствующей линейному закону, в динамическом – «лавинное» наращивание массы протеина с интенсивностью, соответствующей экспоненциальному закону. В результате, в режиме динамического культивирования через двое суток концентрация белка в ферментативной среде в 2,5 раза превышает его концентрацию, достигаемую статическим режимом культивирования (см. рис. 1).

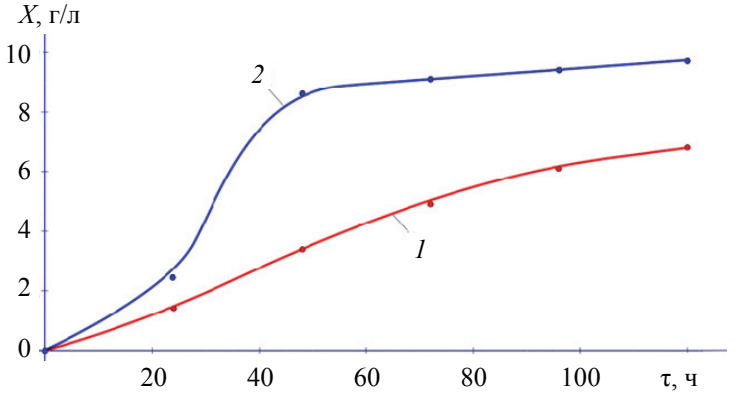


Рис. 1. Изменение концентрации белка в ферментативной среде в процессе статического (*1*) и динамического (*2*) культивирования

Сделанные выводы в полной мере подтверждаются результатами исследования кинетики роста биомассы в ферментативной среде в процессе культивирования, представленными зависимостями удельной скорости прироста протеина для динамического и статического режимов организации процесса (рис. 2).

Удельная скорость роста белка в условиях динамического режима в конце вторых суток примерно в 2,5 раза больше, чем для статического. Однако в последующие трое суток ферментирования кинетические закономерности процесса роста белковой массы претерпевают существенные изменения. Увеличение удельной скорости прироста концентрации белка, наблюдаемое в первые двое суток, в последующий период процесса сменяется ее снижением. Особенно резкое снижение удельной скорости роста белка (более чем в 10 раз) отмечается на третьи сутки для динамического режима организации процесса. Данный результат в сочетании с отмечаемой при этом максимальной массой белка свидетельствует о снижении концентрации ростовых факторов и доступных питательных веществ в субстрате.

В свою очередь в статическом режиме удельная скорость роста белка изменяется в более узком диапазоне на протяжении всего процесса ферментации. Данный результат в сочетании с возможностью существенного сокращения времени ферментации можно рассматривать как прямое подтверждение целесообразности организации процесса ферментолиза целлюлозосодержащего сырья с использованием культуры гриба *Trichoderma viride* в динамическом режиме. При этом значительное снижение продолжительности процесса в условиях «мягкого» механического воздействия очевидным образом обеспечивает снижение энергетических затрат. Интенсификация ферментации в динамическом режиме достигается за счет активного обновления и более развитой поверхности межфазного контакта, а также более интенсивного тепломассообмена. При этом важнейшим положительным эффектом мягкого механического воздействия, приводящим к развитию поверхности межфазного контакта, вполне может быть увеличение центров активного роста мицелия.

Результаты исследования динамики изменения содержания сахаров в процессе биоконверсии целлюлозосодержащего сырья представлены на рис. 3. Результаты измерения, имеющие положительные значения, соответствуют содержанию редуцирующих легкопереваривaемых сахаров (моно- и дисахаров), концентрация которых определена в соответствии с традиционным йодометрическим методом. В дополнение к традиционным данным на рисунке приведены условные отрицательные значения, которые косвенным образом указывают на содержание нередуцирующих сахаров (олигосахаров). Вследствие отсутствия альдегидной группы в химическом составе нередуцирующих сахаров они не обнаруживают

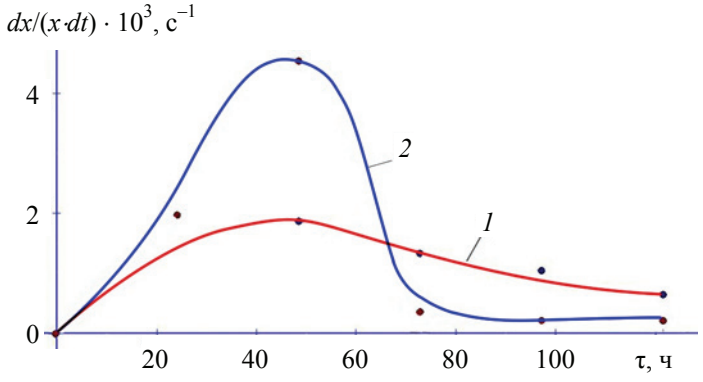


Рис. 2. Изменение удельной скорости прироста содержания белка в ферментативной среде в процессе статического (*1*) и динамического (*2*) культивирования

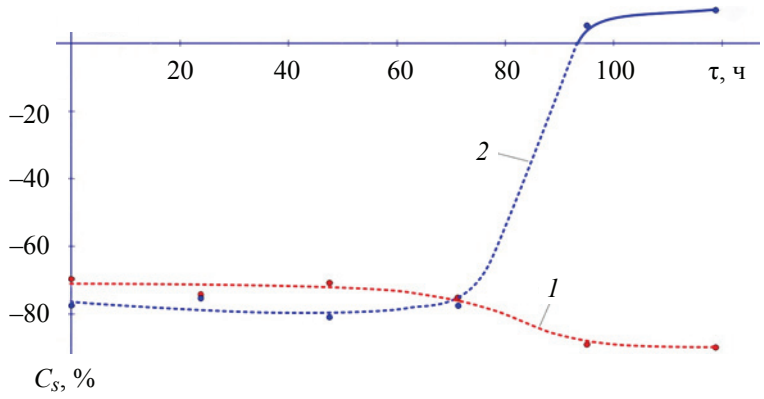


Рис. 3. Динамика тестовых показателей содержания сахаров в ферментативной среде в процессе статического (1) и динамического (2) культивирования

реакционной способности, поэтому традиционный тест приводит к отрицательному результату [8]. Однако при достаточном подкислении реакционного раствора олигосахара деструктируют до редуцирующих сахаров. Примерно одинаковые отрицательные значения для альтернативных вариантов организации процесса косвенно свидетельствуют об одинаковом составе олигосахаров.

Сравнительный анализ динамики содержания сахаров в альтернативных вариантах организации процесса биоконверсии показывает, что в течение первых трех суток ферментирования в обоих режимах культивирования в субстрате содержатся только нередуцирующие сахара. При этом концентрация сахаров находится в обоих случаях примерно на одном уровне. Наблюдаемой динамике можно дать следующее гипотетическое объяснение. Отсутствие редуцирующих сахаров на начальной стадии ферментирования указывает на интенсивное их потребление культурой гриба. На четвертые и последующие сутки в условиях динамического культивирования содержание легкопереваривaемых сахаров резко снижается, и в составе ферментативной среды наряду с нередуцирующими сахарами появляются редуцирующие. По-видимому, такое изменение вызвано достижением концентрации белка в ферментативной среде, близкой к предельной в условиях ферментолиза, при сопутствующем снижении интенсивности ростовых факторов и, как следствие, меньшим потреблением редуцирующих сахаров.

При ферментировании в статическом режиме на завершающем этапе процесса такого рода трансформации в содержании сахаров не наблюдается и, более того, состав нередуцирующих сахаров к концу процесса несколько изменяется. Такую динамику можно объяснить тем, что удельная скорость роста культуры находится в данном периоде на достаточно высоком уровне при сохраняющейся высокой концентрации в культуре ростовых факторов. В связи с этим процесс ферментолиза целлюлозосодержащего субстрата и потребления образующихся при этом редуцирующих сахаров остается достаточно интенсивным. Полученный результат можно рассматривать как дополнительное подтверждение целесообразности организации процесса биоконверсии целлюлозосодержащего сырья с использованием культуры гриба *Trichoderma viride* в динамическом режиме при условии «мягкого» механического воздействия на ферментативную среду.

Дополнительные подтверждения целесообразности организации процесса биоконверсии целлюлозосодержащего сырья в динамическом режиме ферментирования получены путем экспериментального определения изменения содержания целлюлозы и остаточного лигнина. С этой целью проведено исследование кинетики биоконверсии целлюлозы и деструкции лигнина в процессах динамического и статического культивирования. Для получения статистически значимых результатов отбор проб обработка опытных данных проводилась по методике, анало-

гичной использованной в предыдущем эксперименте. Содержание целлюлозы в образцах определяли по методике, регламентированной ГОСТ Р 55293–2012 [9], а количество лигнина оценивали методом, предложенным Всесоюзным научно-производственным объединением целлюлозно-бумажной промышленности, с использованием 72%-й серной кислоты.

Результаты исследования кинетики снижения содержания остаточной целлюлозы в ферментативной среде в процессе биоконверсии для вариантов статического и динамического культивирования представлены на рис. 4. При одинаковом начальном содержании целлюлозы в ферментативной среде ее количество снижается более интенсивно в условиях динамического режима культивирования. Результаты свидетельствуют о том, что на всех этапах процесса скорость биоконверсии целлюлозы в динамическом режиме выше, чем в статическом. Вследствие более высокого темпа снижения концентрации клетчатки в ферментативной среде в динамическом режиме культивирования через трое суток обеспечивается эффект конверсии, аналогичный тому, который наблюдается в статическом режиме лишь спустя еще двое суток. Интенсификация ферментативного гидролиза клетчатки в динамическом режиме достигается за счет более развитой поверхности межфазного контакта, более активного ее обновления и интенсивного тепломассообмена.

На рисунке 5 представлены кинетические кривые, позволяющие оценить темп снижения содержания лигнина в процессе ферментолиза целлюлозы для вариантов статического и динамического культивирования. При сравнении зависимостей *1* и *2* можно сделать вывод о том, что количество остаточного лигнина в ферментируемом субстрате более интенсивно снижается при культивировании в динамическом режиме на всех этапах процесса. Результаты исследования кинетики снижения содержания остаточной целлюлозы и лигнина в ферментативной среде можно рассматривать как прямое подтверждение целесообразности организации процесса ферментолиза целлюлозосодержащего сырья в условиях «мягкого» механического воздействия в динамическом режиме в аппарате с вращающимся барабаном с использованием культуры гриба *Trichoderma viride* [10].

Таким образом, приведенные результаты, с учетом работы [2], позволяют сделать вывод о том, что благодаря правильно подобранному составу питательной среды и созданию благоприятных условий культивирования выбранного микроорганизма в динамическом режиме организации процесса поддерживается более

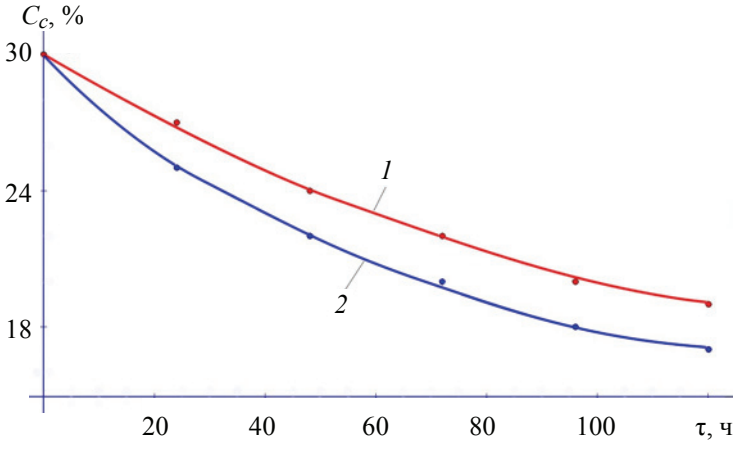


Рис. 4. Изменение количества целлюлозы в ферментативной среде в процессе статического (*1*) и динамического (*2*) ферментирования

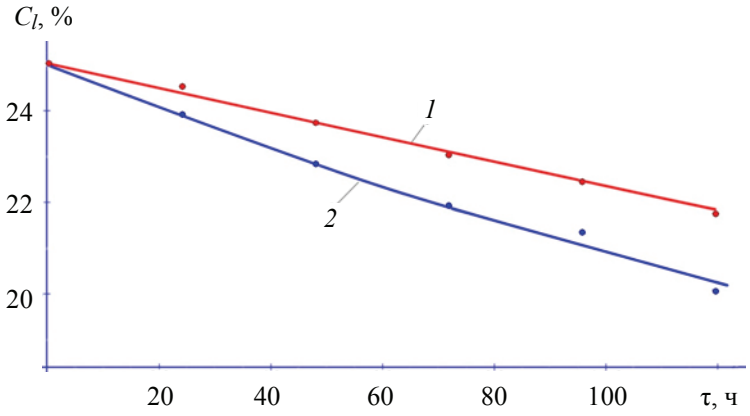


Рис. 5. Изменение содержания лигнина в ферментативной среде в процессе статического (*1*) и динамического (*2*) ферментирования

высокая его биологическая активность. Динамический режим ферментирования обеспечивает протекание процесса при минимальном спорообразовании с формированием больших плодовых тел при их однородном распределении в объеме ферментативной среды. Активная культура обеспечивает интенсивное наращивание в ферментируемой среде белковой массы, концентрация которой через двое суток ферментолиза в 2,5 раза выше концентрации, достигаемой в соответствии с базовым вариантом технологии (культивирование в статическом режиме). Интенсивность биоконверсии целлюлозосодержащего сырья на всех этапах процесса в динамическом режиме ферментирования выше, что обеспечивает возможность сокращения продолжительности процесса, по сравнению с базовым вариантом технологии, более чем на 40 часов.

Список литературы

1. Гайва, Е. Топ-10 грибных проектов. Заявлены производства на 28 млрд рублей / Е. Гайва // Агроинвестор. – 2016. – № 9. – URL : https://www.agroinvestor.ru/rating/article/24141/ (дата обращения: 30.06.2020).

2. Долгунин, В. Н. К разработке технологии и аппаратурного оформления производства субстрата из целлюлозосодержащего сырья / В. Н. Долгунин, А. В. Слепых, В. А Пронин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2019. – Т. 25, № 4. – С. 595 – 602. doi: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.595-602

3. Гнеушева, И. А. Биологическая активность грибов рода Trichoderma и их промышленное применение / И. А. Гнеушева, Н. Е. Павловская, И. В. Яковлева // Вестн. Орловского гос. аграрного ун-та. – 2010. – № 3 (24). – С. 36 – 39.

4. Пат. 27416 Республика Казахстан, МПК A21K 1/00. Способ получения соломобелкового корма / Э. Ж. Сауран, Д. Т. Мирталипов, Г. Ж. Ташимбетов ; заявитель и патентообладатель ТОО «Региональный технопарк в Южно-Казахстанской области». – № 2012/1308.1 ; заявл. 12.12.2012 ; опубл. 15.10.2013, Бюл. № 10. – 3 с.

5. Химический состав солодовых экстрактов. – Текст : электронный / Н. А. Емельянова, В. Н. Кошевая, А. В. Данилевская, Л. В. Диченко // Пищевая промышленность. – 1987. – URL : http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/10292/1/10.pdf (дата обращения: 30.06.2020).

6. ОФС.1.2.3.0012.15 Определение белка. Метод 5 (колориметрический метод с биуретовым реактивом). – Текст : электронный // Фармакопея.рф. – URL : https://pharmacopoeia.ru/ofs-1-2-3-0012-15-opredelenie-belka/ (дата обращения: 30.06.2020).

7. Теоретические основы пищевой биотехнологии : лабораторные работы / О. В. Зюзина, О. Б. Шуняева, Е. И. Муратова, О. О. Иванов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – 48 с.

8. ГОСТ 11960–79. Полуфабрикаты волокнистые и сырье из однолетних растений для целлюлозно-бумажного производства. Метод определения лигина. – Взамен ГОСТ 11960–66 ; введ. 1981–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 5 с.

9. ГОСТ Р 55293–2012 Ферментные препараты для пищевой промышленности. Метод определения целлюлазной активности. – Введ. 2014-01-01. – М. : Стандартинформ, 2014. – 7 с.

10. Иванов, О. О. Управление сегрегированными потоками сыпучих материалов для их обработки методами разделения и соединения / О. О. Иванов, В. А. Пронин, Е. А. Рябова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 397 – 410. doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.397-410

Kinetic Regularities of Bioconversion of Cellulose-Containing Raw Materials Using a Culture of the Fungus *Trichoderma Viride*

V. N. Dolgunin, A. V. Slepykh, V. A. Pronin

Department of Technologies and Equipment for Food and Chemical Industries, a.slepix@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: dynamic and static fermentation; sub-stratum; solid phase bioconversion; cellulose-containing raw materials.

Abstract: The technology of solid-phase bioconversion of cellulose-containing raw materials in a drum apparatus using a culture of the fungus *Trichoderma viride* is proposed. The study of the kinetics of the bioconversion process in the static and dynamic modes of the organization of the fermentation process was carried out. It has been established that bioconversion in a dynamic mode provides a higher intensity of fermentation with obtaining a culture of high activity, which makes it possible to reduce the duration of the process by more than 40 hours.

References

1. https://www.agroinvestor.ru/rating/article/24141/ (accessed 30 June 2020).

2. Dolgunin V.N., Slepykh A.V., Pronin V.A. [On the development of technology and hardware design for the production of a substrate from cellulose-containing raw materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 4, pp. 595-602, doi: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.595-602 (In Russ., abstract in Eng.)

3. Gneusheva I.A., Pavlovskaya N.Ye., Yakovleva I.V. [Biological activity of fungi of the genus Trichoderma and their industrial application], *Vestnik Orlovskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Oryol State Agrarian University], 2010, no. 3 (24), pp. 36-39. (In Russ.)

4. Sauran E.Zh., Mirtalipov D.T., Tashimbetov G.Zh. *Sposob polucheniya solomo-belkovogo korma* [Method of obtaining straw-protein feed], Republic of Kazakhstan, 2013, Pat. 27416. (In Russ.)

5. Yemel'yanova N.A., Koshevaya V.N., Danilevskaya A.V., Dichenko L.V. [The chemical composition of malt extracts], *Pishchevaya promyshlennost'* [Food industry], 1987, № http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/10292/1/10.pdf

6. https://pharmacopoeia.ru/ofs-1-2-3-0012-15-opredelenie-belka/ (accessed 30 June 2020).

7. Zyuzina O.V., Shunyayeva O.B., Muratova Ye.I., Ivanov O.O. *Teoreticheskiye osnovy pishchevoy biotekhnologii: laboratornyye raboty* [Theoretical foundations of food biotechnology: laboratory work], Tambov: Izdatel'stvo Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2006, 48 p. (In Russ.)

8. *GOST 11960–79. Polufabrikaty voloknistyye i syr'ye iz odnoletnikh rasteniy dlya tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva. Metod opredeleniya ligina* [GOST 11960–79. Semi-finished fibrous products and raw materials from annual plants for pulp and paper production. Method for the determination of ligin], Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1980, 5 p. (In Russ.)

9. *GOST R 55293–2012 Fermentnyye preparaty dlya pishchevoy promyshlennosti. Metod opredeleniya tsellyulaznoy aktivnosti* [GOST R 55293–2012 Enzyme preparations for the food industry. Method for determination of cellulase activity], Moscow: Standartinform, 2014, 7 p. (In Russ.)

10. Ivanov O.O., Pronin V.A., Ryabova Ye.A. [Management of segregated flows of bulk materials for their processing by separation and connection methods], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 397-410, doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.397-410 (In Russ., abstract in Eng.)

Kinetische Regelmäßigkeiten der Biokonversion von Cellulose-haltigen Rohstoffen unter Verwendung der Pilzkultur *Trichoderma viride*

Zusammenfassung: Es ist die Technologie der Festphasen-Biokonversion von Cellulose-haltigen Rohstoffen in einem Trommelapparat unter Verwendung der Kultur des Pilzes *Trichoderma viride* vorgeschlagen. Es ist die Untersuchung der Kinetik des Biokonversionsprozesses im statischen und dynamischen Modus der Organisation des Fermentationsprozesses durchgeführt. Es ist festgestellt, dass die Biokonversion im dynamischen Modus eine höhere Fermentationsintensität bietet, wobei eine Kultur mit hoher Aktivität erhalten wird, die es ermöglicht, die Dauer des Prozesses um mehr als 40 Stunden zu reduzieren.

Régularités cinétiques de la bioconversion de matières premières contenant de la cellulose à l'aide d'une culture de champignon *Trichoderma viride*

Résumé: Est proposée la technologie de la bioconversion en phase solide des matières premières contenant de la cellulose dans un appareil à tambour utilisant une culture de champignon *Trichoderma viride.* Est étudée la cinétique du processus de la bioconversion dans les modes statiques et dynamiques de l'organisation du processus de fermentation. Est établi que la bioconversion en mode dynamique produit une intensité de fermentation plus élevée avec une culture à forte activité permettant de réduire la durée du processus de plus de 40 heures.

Авторы: ***Долгунин Виктор Николаевич*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; ***Слепых Анастасия Вячеславовна*** – магистрант; ***Пронин Василий Александрович*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: ***Гатапова Наталья Цибиковна*** **–** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

УДК 519.6
DOI: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.402-410

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРОИЗВОДНЫХ АДАМАНТАНА

Е. А. Марчук[1], А. В. Киреева[2], Я. В. Калинин[3]

Кафедры: «Теоретическая механика» (1), marocci@bk.ru;
«Химия и технология переработки эластомеров» (2),
«Прикладная математика» (3)
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»,
г. Волгоград, Россия

Ключевые слова: адамантан; математическое моделирование; матрица соединения; молекулярное строение; эволюционное моделирование.

Аннотация: Рассмотрены вопросы представления математического моделирования химических соединений на примере производных соединений адамантана. В качестве основного метода применены матричные формы представления молекулярного строения, использование которых следует признать наиболее удобным для построения математических моделей в пакете MATLAB. Обосновано использование теории молекулярных ансамблей при рассмотрении химических соединений с позиции эволюционного моделирования. Показана возможность постановки задачи поиска структуры химических соединений производных адамантана в форме задачи оптимизации с использованием генетических алгоритмов. Сделана попытка обобщения результатов моделирования производных адамантана на более широкий класс молекулярных соединений со сложной пространственной структурой.

Математическое моделирование является важным этапом проведения научного исследования. Как правило, одним из завершающих этапов исследования в естественных и точных науках является постановка численного эксперимента. Таким образом, создание математической модели, в достаточной степени адекватной реальному процессу, является актуальной инженерной задачей. Одной из первых научных работ, посвященных математическому подходу в химии, можно считать труд М. В. Ломоносова «Elementa Chimiae Mathematicae», написанный на латинском языке в 1741 г. [1, 2]. Однако идея Ломоносова несколько опережала свое время, поскольку химия, как наука, еще не оформилась к тому моменту в воззрениях, отображающих понимание, близкое к современному. Бурное развитие химии как науки на протяжении XIX в. ознаменовалось многими выдающимися открытиями и достижениями, включая описание периодического закона Д. И. Менделеева в «Основах химии» (1869). Приведем далее лишь те, которые так или иначе относятся к молекулярному представлению строения веществ: первые обоснования молекулярного строения веществ J. Dalton (1808) и A. Avogadro (1811); принятие научным сообществом молекулярного представления S. Cannizzaro (1858, 1860); графическое представление молекулярных структур и химических связей A. C. Brown (1861); представление молекулярной структуры изомеров А. М. Бутлеров (1861); молекулярное строение циклических структур F. A. Kekule (1865), J. Dewar (1866) и др. [3]. Уровень и значимость этих и многих других открытий уже позволяют рассматривать химию как науку с воззрениями, близкими к современным, начиная с середины XIX века. Таким образом, первыми

математиками, внесшими существенный вклад в химию, как в состоявшуюся науку, можно считать J. J. Sylvester и A. Cayley, научная деятельность которых осуществлялась в обозначенный исторический период и в некоторых значимых работах была тесно связана с задачами представления химических соединений. Математиков связывала многолетняя дружба и плодотворное научное сотрудничество. Ученый J. J. Sylvester старался привести к аналогии химические и математические воззрения, он называл свой подход «алгебраической химией», который, однако, имеет минимальное отношение к современной математической химии. При этом современный математический термин «граф», сохранивший свое первоначальное смысловое значение, является сокращением от термина chemicograph, предложенного J. J. Sylvester для графического представления химических соединений. Математику A. Cayley принадлежат заслуги в комбинаторном подходе в представлении химических соединений. Также он внес большой вклад в развитие матричного и кватернионного исчислений как областей математики. Однако при жизни A. Cayley ни матричное, ни кватернионное представление в химии не использовались [3]. Материал данной статьи имеет непосредственное отношение к химико-математическому наследию J. J. Sylvester и A. Cayley и основывается на графовом и матричном представлении пространственных молекулярных структур. Среди прочих выдающихся ученых XIX – XX вв., внесших существенный математический вклад в химию, отметим P. Waage, C. M. Guldberg, J. H. van't Hoff, R. Bader, A. Gorban. Дальнейшее распространение математических подходов применительно к задачам химии на протяжении XX в. привело к выделению в последней четверти XX в. самостоятельной области – математической химии. На современном этапе математическое моделирование пространственных молекулярных соединений в химии с использованием компьютеров весьма эффективно осуществляется как с использованием матричного, так и кватернионного исчисления, теории графов и иных методов [4, 5]. Один из примеров представления молекулярного строения химических веществ в матричной форме рассматривается в настоящей работе на примере математического моделирования производных адамантана.

Создание математических моделей простых молекул из относительно небольшого числа атомов и с относительно простой пространственной структурой, как правило, не представляет затруднений. В то же время, создание математических моделей полициклических соединений со сложной пространственной конфигурацией может потребовать нетривиального подхода. В качестве примера полициклического соединения со сложной пространственной конфигурацией рассмотрим молекулу адамантана $C_{10}H_{16}$. Выбор адамантана обосновывается тем, что его производные имеют большой потенциал к использованию в различных областях: нанотехнологии, фармакологии и др. [6]. Соответственно представляются актуальными задачи моделирования существующих и гипотетических производных соединений адамантана. Современная химическая наука располагает мощным математическим аппаратом, среди методов которого уделим внимание эволюционным техникам. Первые работы, посвященные вопросам эволюционного моделирования, появились в 1950 – 1960-е гг. XX в. и связаны с именами и работами N. A. Barricelli, H.-J. Bremermann, A. Fraser, I. Rechenbergand H.-P. Schwefel, L. J. Fogel и др. Одной из наиболее используемых областей эволюционного моделирования являются генетические алгоритмы. Методы эволюционного моделирования, особенно генетические алгоритмы, получили широкую известность и популярность после выхода работы J. H. Holland «Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence» (1975) [7]. Генетические алгоритмы широко применяются в задачах поискового конструирования и оптимизации, и в частности, могут использоваться в химии в задачах поиска новых молекулярных соединений. Поскольку обработка данных генетическими алгоритмами заключается в операциях с одномерными

массивами, видится обоснованным представление молекулярного соединения в виде матрицы. Перегруппировка матрицы в одномерный массив не представляет сложности. Матричная форма записи считается одним из наиболее удобных средств при обработке информации. Наиболее популярный программный пакет MATLAB также ориентирован на работу с матричной формой записи и обработки данных [8].

Существуют различные формы представления структуры молекулярных соединений. Наиболее распространенным является представление в записи IUPAC. В моделировании также широко распространена система обозначений SMILE. Акцентируя внимание на математическом моделировании, отметим формы графического представления соединений в виде графа и в виде матрицы. С одной стороны, молекулярная структура химического соединения может быть представлена в виде графа, в котором вершинами являются атомы, а ребрами – связи. Такое представление позволяет проводить математические операции в отношении моделей молекулярных соединений, используя положения теории графов. Для некоторых задач такой подход может быть весьма удобен и результативен. С другой стороны, представление пространственных конфигураций, например, в математике или теоретической механике, часто осуществляется с привлечением методов матричного или кватернионного исчисления. Кватернионное моделирование пространственных молекулярных соединений в контексте настоящего исследования не рассматривается, однако заинтересованные исследователи могут обратиться к работе [9], в которой данный вопрос подробно освещен. Таким образом, молекулярная структура химического соединения может быть представлена в виде матрицы. Такое представление позволяет проводить математические операции в отношении моделей молекулярных соединений, используя обширные возможности матричного исчисления. Для различных задач возможны разные способы заполнения матриц соединений:

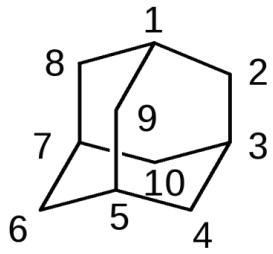
1. С указанием наличия связей между атомами (1 – есть связь, 0 – нет связи). По сути, в данном случае задается пространственный граф в матричной форме. Здесь и далее способы рассматриваются на примере представления молекулы адамантана (рис. 1, *а*).

2. С указанием расстояний между атомами. В данном случае может указываться расстояние между атомами молекулы в количестве связей (рис. 1, *б*). К этому способу можно отнести Z-матрицу представления координат атомов, в которую могут входить атомные номера, длины и углы химических связей. Z-матрица может быть также преобразована в некоторых случаях в декартовы координаты, либо, в других случаях, в форму кватернионной записи.

3. С указанием значения валентных связей между атомами. В конкретном частном случае матрица значения валентных связей адамантана идентична матрице наличия связей (см. рис. 1, *а*). К третьему способу можно также отнести молекулярные ансамбли (ensembles of molecules), представленные в работе [10]. Согласно теории молекулярных ансамблей используются понятия матрицы валентных связей и электронов (BE-matrix) и матрицы реакции (R-matrix). Теория молекулярных ансамблей весьма наглядно в матричной форме отображает химические превращения и позволяет с точки зрения эволюционного моделирования оценить, например, число генных мутаций, необходимых для превращения одного соединения в другое.

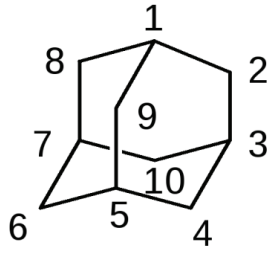
Матрицы соединений представляют собой квадратные матрицы. Атомы водорода могут как учитываться, так и не учитываться при заполнении матрицы. Как уже отмечалось выше, перегруппировка матрицы в одномерный массив не представляет сложности. При рассмотрении задачи с точки зрения эволюционного моделирования после представления матрицы соединения в форме одномерного массива длина хромосомы в относительно простых случаях может составлять

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0
2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1
4	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
5	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0
6	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
7	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1
8	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
9	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
10	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0



а)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	1	2	3	2	3	2	1	1	3
2	1	0	1	2	3	4	3	2	2	2
3	2	1	0	1	2	3	2	3	3	1
4	3	2	1	0	1	2	3	4	2	2
5	2	3	2	1	0	1	2	3	1	3
6	3	4	3	2	1	0	1	2	2	2
7	2	3	2	3	2	1	0	1	3	1
8	1	2	3	4	3	2	1	0	2	2
9	1	2	3	2	1	2	3	2	0	4
10	3	2	1	2	3	2	1	2	4	0



б)

Рис. 1. Матрица соединения адамантана с указанием наличия связей (*а*) и расстояний (*б*) между атомами

от нескольких сотен до нескольких тысяч генов, либо возможно представление матрицы соединения в виде пула хромосом, образованного рядами матрицы. Также в хромосомы может включаться дополнительная информация, например, гены углов химических связей в записи обыкновенного двоичного кода или кода Грэя. Возможны и иные варианты информационного наполнения хромосом. Генетические операторы скрещивания могут быть использованы, например, для поиска изомеров; генетические операторы мутации – для описания реакций. В целом эволюционные техники предоставляют широчайшие возможности в моделировании.

Рассмотрим процесс моделирования реакции бромирования молекулы адамантана с использованием матричной формы записи, предложенной в работе [10]. Сформируем матрицу валентных связей и электронов (BE-matrix) для адамантана и матрицу валентных связей и электронов (BE-matrix) для дибромадамантана. Размеры квадратных матриц модели процесса бромирования адамантана примем 28×28. В результате моделирования получим матрицу реакции (R-matrix). Согласно теории, представленной в работе [10], химическая реакция является процессом изомеризации молекулярных ансамблей посредством перераспределения валентных электронов, число которых остается неизменным.

Фрагмент кода MATLAB, задающего матрицы соединений BE исходного соединения адамантана A и продукта реакции дибромадамантана DBA:

```
% формирование матрицы валентных связей и электронов адамантана
ABE = [a11 ... a128; ... ; a281 ... a2828]

% формирование матрицы валентных связей и электронов дибромадамантана
DBABE = [d11 ... d128; ... ; d281 ... d2828]
```

Фрагмент кода MATLAB, определяющего матрицу реакции R, определяется как разность матриц продукта реакции DBA и исходного соединения A:

```
% вычитание матрицы исходного соединения из матрицы продукта реакции
R = DBABE – ABE
```

Полученная матрица реакции позволяет визуализировать перераспределение валентных электронов в процессе бромирования адамантана.

Обращаясь к теории эволюционного моделирования применительно к химической области, заметим, что генотипом здесь будет являться химическое описание молекулы, а фенотипом – описание свойств соединения [11]. Можно сказать, что в процессе перераспределения валентных электронов количество ненулевых элементов треугольной матрицы реакции соответствует количеству произошедших мутаций. Применительно к упомянутой реакции получения дибромадамантана понадобилось четыре мутации. Практическое использование генетических алгоритмов в моделировании химических соединений может оказаться полезным при поиске новых соединений с заданными свойствами. На основании требуемого фенотипа соединения осуществляется подбор требуемого генотипа, в процессе подбора используются генетические операторы скрещивания, мутации и др. (рис. 2).

Цикл подбора осуществляется до тех пор, пока соединение с заданными свойствами не будет найдено. В данном случае следует отметить преимущество генетического алгоритма как вероятностного метода перед методом простого перебора. Так, для соединений $C_{10}H_{16}$ число изомеров относительно невелико, однако для производных адамантана, с включением относительно сложных радикалов, задача существенно усложняется, и простой перебор возможных вариантов становится нерациональным. Современное решение задач моделирования часто использует включение в модель искусственных нейронных сетей, визуализирующих конечное решение. В качестве примера приведем блок-схему включения искусственной нейронной сети в модель поиска производных соединений адамантана с использованием генетических алгоритмов (рис. 3).

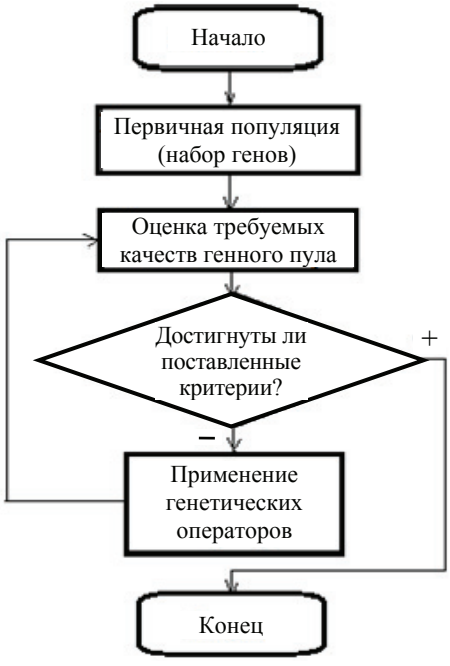


Рис. 2. Блок-схема генетического алгоритма

Задача поиска структуры химического соединения с требуемыми свойствами по своей сути является задачей оптимизации. Ориентируясь на удобство записи и последующей обработки информации, авторы предлагают к использованию матричную форму представления. В настоящей работе рассмотрен один из возможных подходов к решению задач оптимизации – генетические алгоритмы.

Отметим, что генетические алгоритмы, нечеткие системы, искусственные нейронные сети и клеточные автоматы находятся в тесном взаимодействии как в плане теоретической разработки, так и в задачах прикладного характера. Таким образом, перечисленные методы, а также их различные комбинации могут быть успешно использованы для задач математического моделирования химических соединений на примере рассмотренного выше класса производных адамантана.

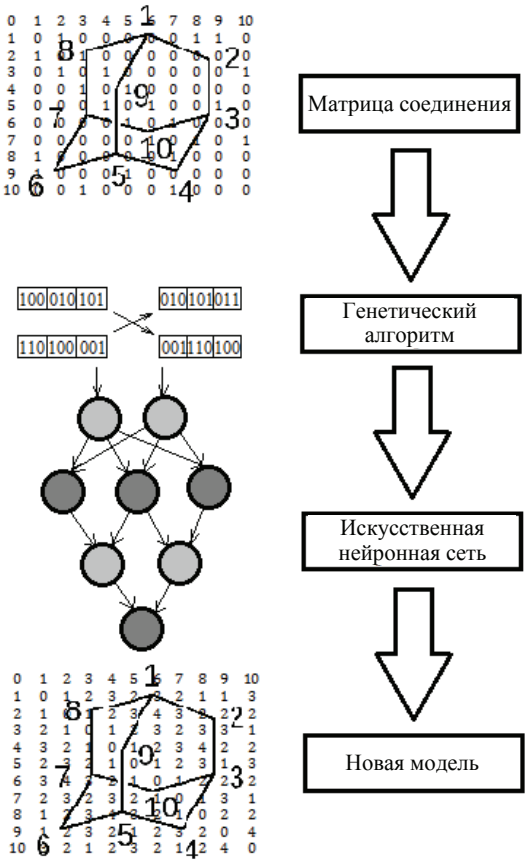


Рис. 3. Схема включения искусственной нейронной сети в модель поиска производных соединений адамантана с использованием генетических алгоритмов

В работе использована ЭВМ с конфигурацией i7-3770, 16 GbRAM на программном обеспечении MATLAB R2019a.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 19-33-90119).

Список литературы

1. Павлова, Г. Е. Михаил Васильевич Ломоносов. 1711 – 1765 / Г. Е. Павлова, А. С. Федоров. – М. : Наука, 1988. – 465 с.

2. Ломоносов, М. В. Полное собрание сочинений. Том 1. Труды по физике и химии. 1738 – 1746 гг. / М. В. Ломоносов. – М. – Л. : Изд-во АН СССР, 1950. – 627 с.

3. Trinajstic, N. Mathematical Chemistry / N. Trinajstic, I. Gutman // Croatia Chemica Acta. – 2002. – Vol. 75, No. 2. – P. 329 – 356.

4. Molecular Modeling. Basic Principles and Applications / H.-D. Holtje, W. Sippl, D. Rognan, G. Folkers. – Wiley-VCH, 2008. – 319 p.

5. Квантово-химическое моделирование молекулярной структуры пигментов с ионами водной примеси и воды / К. В. Брянкин, В. С. Орехов, А. А. Дегтярев, А. И. Бельков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 471 – 480. doi: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.471-480

6. Reduction of Unsaturated Adamantyl-Containing Nitriles with Lithium Aluminium Hydride in 2-Methyltetrahydrofuran / И. А. Новаков, Б. С. Орлинсон, Н. Н. Мамутова [и др.] // Russian Journal of General Chemistry. – 2016. – Vol. 86, No. 6. – P. 1255 – 1258. doi: 10.1134/S1070363216060062

7. Holland, J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence / J. H. Holland. – MIT Press, 1992. – 211 p.

8. Дьяконов, В. П. MATLAB. Полный самоучитель / В. П. Дьяконов. – М. : ДМК Пресс, 2012. – 768 с.

9. Karney, C. F. F. Quaternions in Molecular Modeling / C. F. F. Karney // Journal of Molecular Graphics and Modelling. – 2006. – Vol. 25, No. 5. – P. 595 – 604.

10. New Applications of Computers in Chemistry / I. Ugi, J. Bauer, J. Brandt [et al.] // Angewandte Chemie International Edition in English. – 1979. – Vol. 18, No. 1. – P. 111 – 123.

11. Clark, D. E. Evolutionary Algorithms in Molecular Design / D. E. Clark. – Wiley-VCH, 2000. – 276 p.

Mathematical Modeling of Molecular Compounds of Adamantane Derivatives

E. A. Marchuk[1], A. V. Kireeva[2], Ya. V. Kalinin[3]

Departments of Theoretical Mechanics (1), marocci@bk.ru;
Departments of Chemistry and Technology of Elastomer Processing (2),
Departments of Applied Mathematics (3), Volgograd State Technical University,
Volgograd, Russia

Keywords: adamantane; math modeling; connection matrix; molecular structure; evolutionary modeling.

Abstract: The article deals with the problems of mathematical modeling of chemical compounds by the example of adamantane derivatives. As the main method, matrix forms of representation of the molecular structure are used, the use of which should be recognized as the most convenient for constructing mathematical models in the MATLAB package. The use of the theory of molecular assemblies when considering chemical compounds from the perspective of evolutionary modeling is substantiated. The possibility of formulating the problem of searching for the structure of chemical compounds of adamantane derivatives in the form of an optimization problem using genetic algorithms is shown. An attempt is made to generalize the results of modeling adamantane derivatives to a wider class of molecular compounds with a complex spatial structure.

References

1. Pavlova G.Ye., Fedorov A.S. *Mikhail Vasil'yevich Lomonosov. 1711 – 1765* [Mikhail Vasilievich Lomonosov. 1711 - 1765], Moscow: Nauka, 1988, 465 p. (In Russ.)

2. Lomonosov M.V. *Polnoye sobraniye sochineniy. Tom 1. Trudy po fizike i khimii. 1738 – 1746 gg.* [Complete Works. Volume 1. Works on physics and chemistry. 1738 - 1746], Moscow - Leningrad: Izdatel'stvo AN SSSR, 1950, 627 p. (In Russ.)

3. Trinajstic N., Gutman I. Mathematical Chemistry, *Croatia Chemica Acta*, 2002, vol. 75, no. 2, pp. 329-356.

4. Holtje H.-D., Sippl W., Rognan D., Folkers G. *Molecular Modeling. Basic Principles and Applications*, Wiley-VCH, 2008, 319 p.

5. Bryankin K.V., Orekhov V.S., Degtyarev A.A., Bel'kov A.I. [Quantum-chemical modeling of the molecular structure of pigments with water impurity ions and water], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 3, pp. 471-480, doi: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.471-480 (In Russ., abstract in Eng.)

6. Novakov I.A., Orlinson B.S., Mamutova N.N., Savel'yev Ye.N., Potayonkova Ye.A., Pyntya L.A., Nakhod M.A. Reduction of Unsaturated Adamantyl-Containing Nitriles with Lithium Alumi-nium Hydride in 2-Methyltetrahydrofuran, *Russian Journal of General Chemistry*, 2016, vol. 86, no. 6, pp. 1255-1258, doi: 10.1134/S1070363216060062 (In Eng., abstract in Russ.)

7. Holland J.H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*, MIT Press, 1992, 211 p.

8. D'yakonov V.P. MATLAB. Polnyy samouchitel' [MATLAB. Complete tutorial], Moscow: DMK Press, 2012, 768 p. (In Russ.)

9. Karney C.F.F. Quaternions in Molecular Modeling, *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 2006, vol. 25, no. 5, pp. 595-604.

10. Ugi I., Bauer J., Brandt J., Friedrich J., Gasteiger J., Jochum C., Schubert W. New Applications of Computers in Chemistry, *Angewandte Chemie International Edition in English*, 1979, vol. 18, no. 1, pp. 111-123.

11. Clark D.E. Evolutionary Algorithms in Molecular Design, Wiley-VCH, 2000, 276 p.

Mathematische Modellierung molekularer Verbindungen der Adamantanderivate

Zusammenfassung: Es sind die Fragen der Vorstellung der mathematischen Modellierung chemischer Verbindungen am Beispiel der Adamantanderivaten betrachtet. Als Hauptmethode wurden Matrixformen zur Darstellung der Molekülstruktur benutzt, deren Verwendung als die bequemste für die Konstruktion mathematischer Modelle im MATLAB-Paket angesehen werden sollte. Die Verwendung der Theorie molekularer Ensembles bei der Betrachtung chemischer Verbindungen aus der Perspektive der Evolutionsmodellierung ist begründet. Die Möglichkeit, das Problem der Suche nach der Struktur chemischer Verbindungen von Adamantanderivaten in Form eines Optimierungsproblems unter Verwendung genetischer Algorithmen zu formulieren, ist gezeigt. Es sind Versuche unternommen, die Ergebnisse der Modellierung von Adamantanderivaten auf eine breitere Klasse molekularer Verbindungen mit einer komplexen räumlichen Struktur zu verallgemeinern.

Modélisation mathématique des composés moléculaires dérivés de l'adamantane

Résumé: Sont examinées les questions de la représentation de la modélisation mathématique des composés chimiques à l'exemple des composés dérivés de l'adamantane. En tant que méthode principale, sont utilisées les formes matricielles de la

représentation de la structure moléculaire dont l'utilisation devrait être considérée comme la plus pratique pour construire des modèles mathématiques dans le paquet MATLAB. Est justifiée l'utilisation de la théorie des ensembles moléculaires dans l'examen des composés chimiques du point de vue de la modélisation évolutive Il est possible de définir la tâche de recherche de la structure des composés chimiques dérivés de l'adamantane sous la forme d'un problème d'optimisation à l'aide d'algorithmes génétiques. Est faite une tentative pour généraliser les résultats de la modélisation des dérivés de l'adamantane dans une classe plus large de composés moléculaires avec une structure spatiale complexe.

Авторы: ***Марчук Евгений Александрович*** – аспирант кафедры «Теоретическая механика»; ***Киреева Алина Вячеславовна*** – магистрант кафедры «Химия и технология переработки эластомеров»; ***Калинин Ярослав Владимирович*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная математика», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Россия.

Рецензент: ***Дьячкова Татьяна Петровна*** **–** доктор химических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

УДК 677.074
DOI: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.411-420

A RESOURCE-SAVING PROCESS OF EXTRACTING INDUSTRIAL CONTAMINATS FROM FIBROUS MATERIAL

M. K. Kosheleva[1], O. R. Dornyak[2], M. Z. Tsintsadze[1]

Department of Energy and Resource Effective Technologies, Industrial Ecology and Safety, oxtpaxt@yandex.ru; The Kosygin State University of Russia (1), Moscow, Russia; Department of Electrical Engineering, Heat Engineering and Hydraulics, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (2), Voronezh, Russia

Keywords: cotton fibrous flat material; extraction; kinetics; magnetic field; resource saving.

Abstract: The study of the kinetics of extraction of unfixed dye from a colored fibrous terry flat material using a washing solution to intensify the process of magnetic processing was carried out. The possibility of reducing the duration of the process, reducing the concentration of chemicals in the formulation of the working solution, the amount of waste water and their contamination was shown.

Improving the efficiency of the process of extraction (washing) of industrial contaminants from fibrous materials due to its intensification is an urgent task, since its solution allows reducing the consumption of clean washing water and chemicals, in particular surfactants, the amount of wastewater, energy costs for the process [1 – 5].

There are some publications on the intensification of the processes of extraction of industrial contaminants from fibrous materials under the influence of electric discharges, magnetic fields, ultrasonic fields, etc. Methods for calculating the kinetics of intensified processes are proposed [4 – 12].

The design of new efficient heat and mass transfer equipment and the modernization of existing equipment require additional experimental studies of heat and mass transfer processes and methods for their calculation [1, 5, 12, 13].

The purpose of the paper is to study the process of extracting (washing) unfixed dye from terry cotton fabric to increase resource efficiency, improve production and environmental safety with a reasonable choice and use the intensifying effect - magnetization of the wash solution, study the laws of the washing process, evaluate the effectiveness of the selected method of intensification.

To achieve this goal, it is necessary to study the kinetics of the washing process of the selected object, to analyze the results of studies of the mass transfer process that occurs during the magnetization of the washing solution. Assessment of energy and resource efficiency, safety and economic efficiency of the process under study, comparison of industrial and environmental safety during the washing process under the current and intensified mode.

Intensification of washing fabrics, which is periodic and very long process that would reduce its duration, and thus the time of exposure to hazardous and harmful factors in the work area, in addition, the surfactant concentration may be reduced or

complete elimination of soda ash. To solve this problem, it is necessary to use the results of experimental studies and analysis of the fabric selected for the study as an object of technological processing.

The object of study is a cotton terry fabric (100 %). Surface weight: 410 g/m^2, web width: 159 cm, weight per meter: 429 g, weight of m^2: 270 g, average fiber length ranges from 22 to 50 mm with a cross section of 18 – 25 microns. The average fiber strength is 4–5 cN, the breaking length is 24 – 34 km, and the elongation at break is 7–8 %.

Table 1 shows the characteristics of the tissue, and the values of the inner surface and specific pore volume are determined experimentally by the method of adsorption of water vapor and methanol. In Table 2 there is a characteristic of the washing process.

Table 1

Characterization of the object of study

Characteristic	Value
Internal surface area, m^2/g:	
water	94 – 137
methanol	20 – 82
Pore volume, cm^3/g:	
water	0.130
methanol	0.142
Density, g/cm^3	1.52
Volumetric swelling in water	45
Moisture absorption at 20 °C and φ = 65 %	7 – 9

Table 2

Technological features of washing process

Technological operation	Temperature, °C	Time, min
1	2	3
Washing - stream. The circulation of the solution. The water valve is open at 70%	20	15
Drain of the solution		
Filling the barque with soft water		
Washing with a rise in temperature to 85 °C for 22 minutes. Solution circulation for 15 minutes.		15
Cooling the solution to a temperature of 75 °C. Solution circulation		
Drain of the solution		
Filling the barque with soft water		
Call operator. Light signal. Preparation of chemical materials in a dosing tank: “VIK” (synthetic detergent) – 1 g/l - 2.0 liter		5
Injection of chemical materials into the apparatus		
Soaping at a temperature of 95 °C for 20 minutes	95	20
Cooling the solution to a temperature of 75 °C for 7 minutes. Solution circulation	75	7
Drain of the solution		

Continuation of table 2

1	2	3
Washing at 75 °C for 15 minutes	75	15
Drain of the solution		
Filling the barque with soft water		
Call operator. Light signal. Preparation of chemical materials in a dosing tank: "Tratskan GF" – 2,0 g/l – 4,0 kg, Acetic acid 30% – 0.5 g/l – 1.0 l		5
Submission of chemical materials to the barque		
Heating to 40 °C. Mellowing at a temperature of 40 °C for 20 minutes	40	20
Drain of the solution		

At ZAO "Moskovskij shelk" (currently withdrawn from Moscow) and current similar enterprises, washing of fabric is carried out mainly with a tow.

The process of washing fabrics in an industrial environment is very lengthy. Therefore, the task of intensifying the washing process is particularly acute.

A joint analysis of the results obtained and the washing kinetics curves shows that significant intra-diffusion resistance takes place in the process.

To intensify the washing process of materials with high intradiffusion resistance, it is advisable to use ultrasonic or magnetic fields.

Studies show that the effect of ultrasound is very effective; however, the actual implementation of ultrasonic devices on existing industrial equipment is quite complicated and expensive. The use of magnetic fields is simpler and cheaper [12].

Magnetic treatment accelerates the coagulation of suspensions, wetting of solid surfaces with water, adsorption of surfactants, crystallization and dissolution processes.

Using magnetic treatment, it is possible to reduce the formation of various deposits on hard surfaces (for example, scale of various salts). In industry, thousands of magnetic devices are used for this purpose. Magnetic treatment improves the purification of water from suspensions. Treated water changes its biological properties [11, 12].

In the technological processes of the textile industry, the requirements for the quality of activation of water systems should be more stringent, as this is due to the quality of the products. Due to the fact that the effects of magnetic processing do not accumulate and are not mutually compensated, it is very important to choose the correct magnetic field parameters [11]. The mechanism of the influence of a magnetic field on water and its impurities cannot be considered sufficiently identified. Known considerations and hypotheses of various authors are mainly based on the polarizing effect of a magnetic field on ions and water molecules. Moreover, in the case of magnetic treatment of natural water in a state of thermodynamic equilibrium, there is no reason to assume the real possibility of occurrence, and even more so the long-term preservation ("magnetic memory") of any changes in water under the influence of relatively weak magnetic fields. In this regard, it is likely that the action of a magnetic field during water treatment can manifest itself only in thermodynamically non-equilibrium systems, i.e. systems in an unstable state [11, 12].

Numerous observations and experiments show that if, during washing, water consumption is reduced by 50% using a magnetic apparatus, the quality of washing remains unchanged. If you do not reduce the water flow for washing, the use of magnetic treatment can dramatically improve the quality of washing. The objective of the study is to study the technological process of extraction (washing) of unfixed dye from terry cotton fabric to increase resource efficiency, improve production and environmental safety with a reasonable choice and use of the intensifying effect - magnetization of the wash solution.

To conduct an experimental study of the washing process, a setup was used to simulate washing baths with vertical filling of tows. The experiment was carried out in the laboratory of general chemical technology at the department of PACT of the Kosygin State University of Russia.

In accordance with the technological regime developed at the department of PACT and Vital Security, a mixture of anionic and nonionic surfactants in a certain ratio was used in the washing solution.

The duration of each stage was recorded by a stopwatch, the temperature of the water was monitored using a thermometer, and the volume of water was measured by a measuring cylinder.

After the washing process, the dried tissue samples were tested for color fastness to dry friction in accordance with GOST 9733.27-83 (ST SEV 5444-85) * "Textiles. Test method of colour fastness to crocking".

The magnetization of the wash water was carried out using a device for magnetic treatment CO-3, the technical characteristics of which are presented in Table 3.

Samples of fabric that were dyed were washed strictly in accordance with the technology of ZAO "Moskovskij shelk".

First, dyeing was carried out on ordinary tap water. A tissue sample was dyed with an active dye for 10 minutes at a temperature of 20 °C, and then it was dyed with a rise in temperature to 60 °C for 40 minutes. Then, soda ash 5 g/l was introduced and when the temperature rose to 90 ° C (within 15 minutes), it was painted for 40 minutes. Cooling the solution to 75 °C lasted 5 minutes. After dyeing, the samples were washed according to the technological scheme described in Table 2.

The analysis of the active dye content was carried out according to the well-known method of colorimetrication of dye solutions after washing the fabrics to 100% washing in laboratory conditions.

The amount of dye on the fabric was determined using a KFK 2 photocolorimeter and calibration curves obtained previously at the Department of PACH for various dyes.

Samples were studied by the method of the maximum amount of dye desorbed from the test sample of fabric as a result of 100 % washing solution dyed with colorimetric method after 100 % washing.

An exact weighed sample of fabric with a mass of 0.2 - 0.4 g is washed repeatedly in a solution containing 2 g/l of surfactant at a temperature of 100 °C until all unstained dye is removed from the sample.

Then, the resulting washing solutions are combined and diluted to a certain volume in a volumetric flask.

The resulting solution is colorimetric, and the concentration of the unstained dye desorbed from the sample is determined from the previously constructed calibration line. This amount is taken as 100 % washing.

Table 3

Technical characteristics of the device for magnetic treatment of water

Nomination	Parameter
The value of magnetic induction in the gates between the magnets	not less than 100 mT
Weight	no more than 0.4 kg
Dimensions	∅75x116 mm
Internal diameter of the attached hose	16 mm
Maximum allowable pressure at the inlet of the device	no more than 4 kg/cm^2

The amount of dye α (g/kg of fabric) removed from the sample is calculated by the formula (1)

$$\alpha = \frac{CV1000}{\gamma}, \quad (1)$$

where C is the dye concentration according to the calibration curve, g/l; V is the volume of the volumetric flask, l; γ – hinge of dyed fabric, g.

For analysis of the dye content on the canvas, not one sample was taken, but three from different places of the sample. The determination of the dye content on textile materials was carried out according to known methods.

The method for colorimetric acid hydrosols is described below. In accordance with this method, a piece of tissue is cut out of a stained sample, weighed, crushed and dissolved in acid. The amount of dye is determined by the optical density of the solution. In this case, it is determined not the absolute value of the amount of dye fixed by the textile material, but its change at different parameters of the magnetic treatment with respect to the control sample (painted without using magnetic fields), i.e. difference

$$\Delta G = G - G_0, \quad (2)$$

where G and G_0 are the amount of dye fixed by a unit mass of fabric, respectively, using and without magnetic treatment of solutions, g/kg.

Due to the fact that the amount of dye remaining on the fabric, even when dyeing under the same conditions in control water from experiment to experiment, does not remain constant, and also because of the desire to use a dimensionless quantity to estimate the change in the amount of dye absorbed by the fabric, it was used relative value

$$\eta = \frac{C_0 - C_i}{C_0} \cdot 100\,\%, \quad (3)$$

where C_0 is the initial concentration of the dye on the fabric, g/kg; C_i – current dye concentration on the fabric, g/kg.

The concentration of surfactant in the solution (a mixture of anionic and nonionic surfactants) was 0.8 g/l.

Figure 1 shows the kinetic curves for washing cotton terry cloth, where the upper curve is the average value of the dye content in the fabric when washing without magnetization, the lower curve is the average value of the dye in the fabric when washing with magnetization.

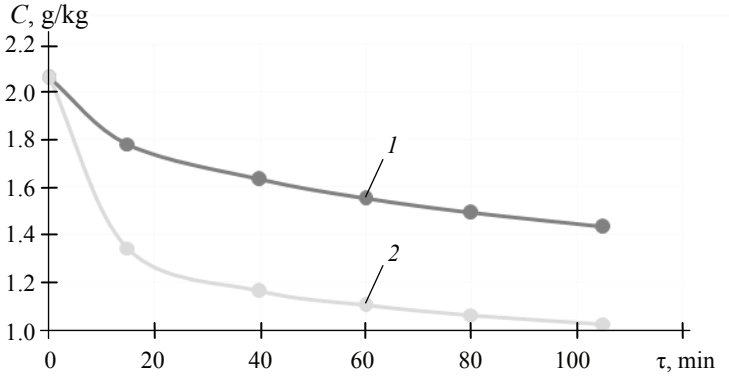


Fig. 1. Kinetic curves of washing terry cotton fabrics:
1 – without magnetization; *2* – with magnetization

Figure 2 shows the change in the degree of washing of tissue, where the upper curve is the change in the degree of washing of fabric with magnetization, the lower curve is the change in the degree of washing of fabric without magnetization.

Each point is the average value of 3 experiments when washing without the use of an intensifier and with its use.

As a comparative analysis of kinetic curves shows when using magnetic water, the duration of the process is reduced by an average of 22 %. At the same time, soda ash is completely removed, the concentration of surfactants is reduced from 1 to 0.8 g/kg due to the use of a mixture of anionic and nonionic surfactants during washing using a magnetic device, the consumption of clean water and heat for its heating is reduced.

Mathematical processing of the results of the study of the kinetics of dyed tissue was carried out using the least square method.

Equation (4) obtained

$$C' = e^{-0.006\tau+0.54}. \quad (4)$$

A comparison of experimentally obtained during the study of the kinetics of the washing process with magnetization and calculated data are given in table 4.

Table 4 shows that the discrepancy between the experimental and calculated data is significant in the first washing period. Relative errors in the second period of the process are within the limits acceptable for engineering calculations.

Research and practical development on the use of magnetization of water systems was carried out in the works of M.I. Davidzon [12].

The analysis of the environmental safety of the process under the current and intensified modes was conducted. The annual discharge of pollutants into the water resource by the example of the considered enterprise is shown in Table 5.

Based on the data in the table, it can be concluded that the charge for emissions of pollutants into water bodies will be significantly reduced.

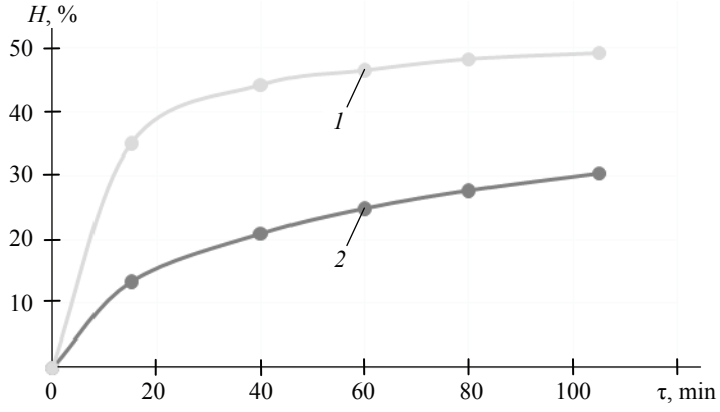


Fig. 2. Change the degree of washing terry cotton fabric:
1 – with magnetization; *2* – without magnetization

Table 4

Comparison of experimental and calculated data during the study of the kinetics of the washing process with magnetization

τ, s	0	15	40	60	80	105
C' experimental	2.06	1.34	1.29	1.21	1.06	1.02
C' calculated	1.33	1.27	1.17	1.10	1.03	0.95

Table 5

Characteristics of pollutant discharges

Characteristics	Surfactant, t/year	Soda ash, t/year
Under the current technological regime	4.40	1.1
With intensified technological mode	2.46	0
Permissible Norm	6.40	2.0

Savings will be achieved by reducing emissions into the air. A rough estimate suggests that the savings could be at least 5 rubles per linear meter of flat fibrous material.

Conclusions. An assessment of energy saving and safety issues in the finishing production of a textile enterprise was carried out using the example of ZAO "Moskovskij shelk", which showed that one of the important tasks of improving working conditions and safety is to improve the technology of batch processes, in particular, the washing process, since this process is resource-intensive a source of negative impact on workers in the finishing industry and on the environment.

An experimental study was carried out of the kinetics of tissue washing, article 13592, dyed with an active dye without the use of an intensifier and using magnetic treatment of water to prepare a washing solution. The result of the study is the fact that when using magnetic water, the duration of the process is reduced by an average of 22 % (from 1 hour 45 minutes to 1 hour 20 minutes). It was shown that it is possible to completely eliminate soda ash from the wash solution formulation, reduce the concentration of surfactants from 1 g/l to 0.8 g/l through the use of a mixture of anionic and nonionic surfactants, and reduce the amount of wastewater and its pollution. Practical recommendations were developed to intensify the washing process, a device for magnetic treatment of water was selected, and a scheme for its installation with technological equipment was proposed.

An approximate economic assessment shows that the use of magnetization of the working solution can lead to a reduction in the cost of electricity, clean water, by reducing the time of the washing process. Perhaps a decrease in the concentration of surfactants and the elimination of soda ash.

References

1. Kosheleva M.K. *Protsessy i apparaty tekstil'nykh tekhnologiy v primerakh, laboratornykh rabotakh i testakh: uchebnoe posobiye* [Processes and apparatuses of textile technologies in examples, laboratory works and tests: textbook. allowance], Moscow: INFRA-M, 2019, 321 p. (In Russ.)

2. Kosheleva M.K., Shchegolev A.A., Shatskikh S.N., Apal'kova M.S. [Intensification of washing processes with the application of ultrasonic fields], *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti* [University proceedings. Technology of the textile industry], 2012, no. 3 (339), pp. 113-117. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Kosheleva M.K. [Improving the production and environmental safety of the finishing production of fine-woven factories by improving technology], *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti* [University proceedings. Technology of the textile industry], 2005, no. 2 (283), pp. 100-105. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Pavlyukevich N.V. *Vvedeniye v teoriyu teplo- i massoperenosa v poristykh sredakh* [Introduction to the theory of heat and mass transfer in porous media], Minsk: ITMO NAN RB, 2003, 140 p. (In Russ.)

5. Aksel'rud G.A. *Massoobmen v sisteme tverdoye telo – zhidkost'* [Mass transfer in a solid-liquid system], Lviv: Izdatel'stvo L'vovskogo universiteta, 1970, 187 p. (In Russ.)

6. Rudobashta S.P., Kosheleva M.K., Kartashov E.M. Mathematical Simulation of the Extraction of a Blending Agent from Cylindrical Bodies in the Semicontinuous Regime, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2016, vol. 89, no. 3, pp. 606-613, doi: 10.1007/s10891-016-1417-5

7. Rudobashta S.P., Kosheleva M.K., Kartashov E.M. Nonstationary Mass Transfer Near the Surface of a Cylindrical Body, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2015, vol. 88, no. 6, pp. 1320-1328, doi: 10.1007/s10891-015-1316-1

8. Romankov P.G., Kurochkina M.I. *Ekstragirovaniye iz tverdykh materialov* [Extraction from solid materials], Leningrad: Khimiya, 1983, 256 p. (In Russ.)

9. Kazub V.T., *PhD Dissertation* (*Technical*), Pyatigorsk, 2002, 345 p. (In Russ.)

10. Kosheleva M.K., Shatskikh S.N. [Energy-saving mode of extraction of technological pollution from woolen cloths], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 3, pp. 584-592. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Klassen V.I. [Ed.] *Voprosy teorii i praktiki magnitnoy obrabotki vody i vodnykh sistem* [Questions of theory and practice of magnetic treatment of water and water systems], Moscow: Tsvetmetinformatsiya, 1971, 315 p. (In Russ.)

12. Davidzon M.I. *Elektromagnitnaya obrabotka vodnykh sistem v tekstil'noy promyshlennosti* [Electromagnetic treatment of water systems in the textile industry], Moscow: Legprombytizdat, 1988, 178 p. (In Russ.)

13. Sazhin B.S., Fedosov S.V., Kosheleva M.K. [Formation of scientific directions and reflection of scientific achievements in the field of increasing the efficiency of heat and mass transfer processes, environmental and industrial safety of textile industries in the section "Environmental and industrial safety. Promteploenergetika"], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti* [Proceedings of higher educational institutions. Textile industry technology], 2018, no. 4 (376), pp. 116-122. (In Russ., abstract in Eng.)

Ресурсосберегающий процесс экстрагирования технологических загрязнений из волокнистого материала

М. К. Кошелева[1], О. Р. Дорняк[2], М. З. Цинцадзе[1]

Кафедра «Энергоресурсоэффективные технологии, промышленная экология и безопасность», oxtpaxt@yandex.ru; ФГБОУ ВО «Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)» (1), г. Москва, Россия; кафедра электротехники, теплотехники и гидравлики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова» (2), г. Воронеж, Россия

Ключевые слова: кинетика; магнитное поле; ресурсосбережение; хлопчатобумажный волокнистый плоский материал; экстрагирование.

Аннотация: Проведено изучение кинетики экстрагирования незафиксированного красителя из окрашенного волокнистого махрового плоского материала с использованием для интенсификации процесса магнитной обработки промывного раствора. Показана возможность сокращения продолжительности процесса, снижения концентрации химических реагентов в рецептуре рабочего раствора, количества сточных вод и их загрязненности.

Список литературы

1. Кошелева, М. К. Процессы и аппараты текстильных технологий в примерах, лабораторных работах и тестах : учеб. пособие / М. К. Кошелева. – М. : ИНФРА-М, 2019. – 321 с.
2. Интенсификация процессов промывки с наложением ультразвуковых полей / М. К. Кошелева, А. А. Щеголев, С. Н. Шацких, М. С. Апалькова // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012. – № 3 (339). – С. 113 – 117.
3. Кошелева, М. К. Повышение производственной и экологической безопасности отделочного производства тонкосуконных фабрик за счет совершенствования технологии / М. К. Кошелева // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2005. – № 2 (283). – С. 100 – 105.
4. Павлюкевич, Н. В. Введение в теорию тепло- и массопереноса в пористых средах / Н. В. Павлюкевич. – 2-е изд. – Минск : ИТМО НАН РБ, 2003. – 140 с.
5. Аксельруд, Г. А. Массообмен в системе твердое тело – жидкость / Г. А. Аксельруд. – Львов : Изд-во Львовского университета, 1970. – 187 с.
6. Rudobashta, S. P. Mathematical Simulation of the Extraction of a Blending Agent from Cylindrical Bodies in the Semicontinuous Regime / S. P. Rudobashta, M. K. Kosheleva, E. M. Kartashov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2016. – Vol. 89, No. 3. – P. 606 – 613. doi: 10.1007/s10891-016-1417-5
7. Rudobashta, S. P. Nonstationary Mass Transfer Near the Surface of a Cylindrical Body / S. P. Rudobashta, M. K. Kosheleva, E. M. Kartashov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2015. – Vol. 88, No. 6. – P. 1320 – 1328. doi: 10.1007/s10891-015-1316-1
8. Романков, П. Г. Экстрагирование из твердых материалов / П. Г. Романков, М. И. Курочкина. – Л. : Химия, 1983. – 256 с.
9. Казуб, В. Т. Кинетика и основы аппаратурного оформления процессов электроразрядного экстрагирования биологически активных соединений : дис. … д-ра техн. наук : 05.17.08 / Казуб Валерий Тимофеевич. – Пятигорск, 2002. – 345 с.
10. Кошелева, М. К. Энергоресурсосберегающий режим экстракции технологических загрязнений из шерстяных полотен / М. К. Кошелева, С. Н. Шацких // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 3. – С. 584 – 592.
11. Вопросы теории и практики магнитной обработки воды и водных систем / Под общ. ред. В. И. Классена. – М. : Цветметинформация, 1971. – 315 с.
12. Давидзон, М. И. Электромагнитная обработка водных систем в текстильной промышленности / М. И. Давидзон. – М. : Легпромбытиздат, 1988. – 178 с.
13. Сажин, Б. С. Формирование научных направлений и отражение научных достижений в области повышения эффективности тепломассообменных процессов, экологической и производственной безопасности текстильных производств в разделе «Экологическая и производственная безопасность. Промтеплоэнергетика» / Б. С. Сажин, С. В. Федосов, М. К. Кошелева // Изв. высш. учеб. заведений. Технология текстильной промышленности. – 2018. – № 4 (376). – С. 116 – 122.

Ressourcenschonender Extraktionsprozess der technologischen Verunreinigungen aus Fasermaterial

Zusammenfassung: Die Untersuchung der Kinetik der Extraktion eines nicht fixierten Farbstoffs aus einem gefärbten faserigen Frottee-Flachmaterial unter Verwendung einer Waschlösung zur Intensivierung des Magnetbehandlungsprozesses ist durchgeführt worden. Die Möglichkeit, die Dauer des Prozesses zu verringern, die Konzentration chemischer Reagenzien in der Formulierung der Arbeitslösung, die Abwassermenge und deren Verunreinigung zu verringern, ist gezeigt.

Processus d'extraction économe en resources des pollutions technologiques des matériaux fibreux

Résumé: Est étudiée la cinétique de l'extraction d'un colorant non fixé à partir d'un matériau plat éponge fibreux coloré avec une utilisation d'une solution de lavage pour intensifier le processus du traitement magnétique. Est montrée la possibilité de réduire la durée du processus, de réduire la concentration des réactifs chimiques dans la formulation de la solution de travail, la quantité d'eaux usées et leur pollution.

Авторы: ***Кошелева Мария Константиновна*** – кандидат технических наук, профессор кафедры «Энергоресурсоэффективные технологии, промышленная экология и безопасность», ФГБОУ ВО «Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», г. Москва, Россия; ***Дорняк Ольга Роальдовна*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники, теплотехники и гидравлики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», г. Воронеж, Россия; ***Цинцадзе Марина Зиевна*** – аспирант кафедры «Энергоресурсоэффективные технологии, промышленная экология и безопасность», ФГБОУ ВО «Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», г. Москва, Россия.

Рецензент: ***Гатапова Наталья Цибиковна*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

УДК 001.891.572, 628.4.042
DOI: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.421-430

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ

М. Ю. Балабанова[1], С. Ю. Панов[2], А. А. Хвостов[3]

Кафедра промышленной экологии, оборудования химических и нефтехимических производств, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (1); кафедра математики, su-panov@yandex.ru; ФГКВОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (2); кафедра прикладной математики и механики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (3), г. Воронеж, Россия

Ключевые слова: кинетика пиролиза; математическая модель; пирогаз; пиролиз; тепломассообмен; химико-термическая переработка; целлюлоза.

Аннотация: Рассмотрены вопросы численного моделирования химико-термической переработки целлюлозосодержащих отходов. Результаты моделирования представлены в сопоставлении с данными экспериментов, проведенных в горизонтальном пиролизном реакторе с ворошителем при различных температурах процесса. На проведение процесса и получаемые продукты оказывают влияние факторы скорости перемешивания продуктов в активной зоне реактора и распределение температур в данной зоне. Для описания тепловых процессов и химической кинетики пиролиза целлюлозы выбрана модель, предложенная Ю. Дином, в которой процесс представлен гетерогенной реакцией *n*-порядка и уравнением Аррениуса. Принято, что процесс теплоотдачи при пиролизе протекает внутри горизонтальной трубы круглого сечения в условиях свободной конвекции в ограниченном объеме, имеющей избыточную температуру по отношению к окружающему пространству. Показано, что полученные при помощи численного моделирования результаты позволяют выбрать наиболее оптимальное значение линейного перемещения материала в корпусе реактора в зависимости от требуемого режима химико-термической переработки целлюлозосодержащих отходов.

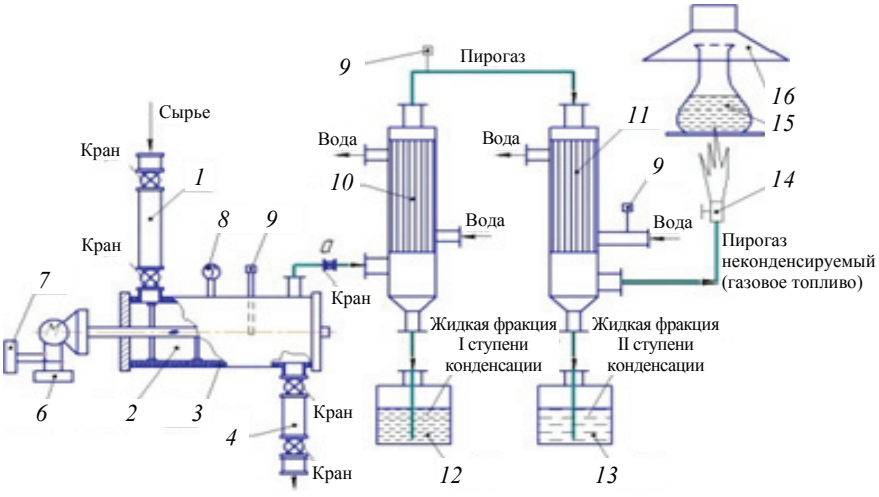
На предприятиях пищевой, в частности, пивоваренной и сахарной, лесной и деревообрабатывающей, промышленности образуются крупнотоннажные органические отходы, имеющие высокий энергетический потенциал [1]. Существуют методы переработки целлюлозосодержащих отходов [2] с получением полезных продуктов, однако они позволяют переработать лишь небольшой объем отходов за довольно длительное время, основная же часть отходов отправляется на полигоны и хранилища, занимающие большие площади плодородных земель. При этом продукты естественного распада наносят существенный вред окружающей среде.

В состав рассматриваемых отходов входит органическое соединение – целлюлоза, химико-термическая деструкция которой дает широкий ассортимент углеводородных веществ с различной молекулярной массой, представляющих интерес как потенциальные источники топлива в результате переработки отходов.

В связи с этим в качестве метода переработки предлагается способ химико-термической переработки (**ХТП**).

Для обоснования разработанного способа и исследования эффективности процесса ХТП целлюлозосодержащих отходов (**ЦО**) разработана модель лабораторного горизонтального реактора, схема и общий вид которой представлены на рис. 1 [3 – 5].

Модельный реактор (рис. 2) состоит из горизонтальной цилиндрической обечайки *1* с отверстиями для установки патрубков для загрузки сырья *2* и выгрузки твердого остатка *3*, а также для установки датчика температуры *4*. С обеих сторон к обечайке приварены плоские фланцы *5*, которые закрываются крышками *6* и стягиваются болтами *7*. Внутри реактора установлен вал *8* с приваренными к нему лопатками *9* (ворошитель). Вал крепится в опорах *10*.



а)

б)

Рис. 1. Схема (*а*) и общий вид (*б*) лабораторной установки:
1, *4* – устройства загрузочное и разгрузочное соответственно; *2* – реактор пиролизный; *3* – обогрев электрический; *5* – ворошитель; *6* – привод; *7* – регулятор оборотов электродвигателя; *8* – манометр; *9* – термометр; *10*, *11* – конденсаторы первой и второй ступеней соответственно; *12*, *13* – емкости для сбора жидкой фракции; *14* – горелка; *15* – колба с водой; *16* – вытяжка

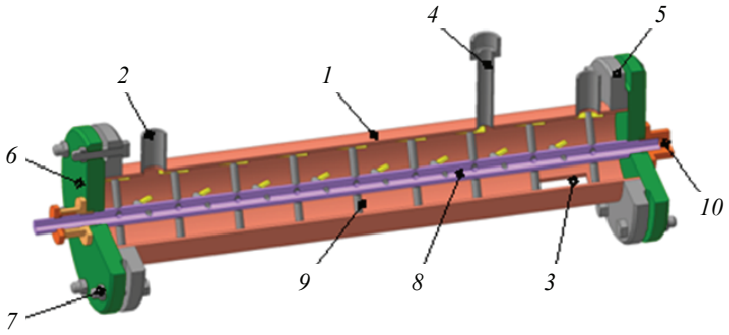


Рис. 2. Модель лабораторного горизонтального реактора

В результате химико-термической переработки ЦО образуются горючий газ, высокоэнергетические жидкие продукты и коксовые продукты. Выход того или иного продукта, а также их энергетические и химические свойства зависят как от температуры процесса, так и скорости теплообмена между веществами и теплоносителем, свойств сырья.

При быстром нагреве и температурах до 500 °С в большом объеме образуется пирожидкость, представляющая собой смесь органических соединений с водой. Парогазовая смесь достаточно быстро удаляется из активной зоны реактора в зону конденсации.

При более высоких температурах и большем времени нахождения продуктов в активной зоне реактора сложные органические соединения подвергаются последующему разложению и, таким образом, в большей степени образуется пирогаз, состоящий из легких углеводородов, водорода, диоксида углерода.

Медленное протекание процесса способствует так называемой карбонизации с получением наибольшего количества твердого остатка (кокса).

Таким образом, на проведение процесса и получаемые продукты преобладающее влияние имеют факторы времени пребывания продуктов в активной зоне реактора, зависящей от распределение температур в ней.

Существует много исследований различных аспектов моделирования реакций при термическом разложении ЦО [6 – 9]. Среди моделей, наиболее полно и с приемлемой для технических расчетов погрешностью, описывающих тепловые процессы и химическую кинетику пиролиза целлюлозы, следует выделить модель, предложенную Ю. Дином с соавторами [10, 11]. Процесс пиролиза описан гетерогенной реакцией *n*-порядка и уравнением Аррениуса и рассмотрен для трех компонентов: пирогаза, пирожидкости и твердого остатка.

Решение поставленных задач осуществлено на примере моделирования задачи сопряженного тепломассообмена: теплоотдачи внутри горизонтальной трубы круглого сечения в условиях свободной конвекции в ограниченном объеме. Поверхность трубы в данном случае рассматривалась как неподвижная, изотермичная, имеющая избыточную температуру по отношению к окружающему пространству.

Температурное поле в активной зоне реактора при нестационарном термоконвективном переносе с учетом наличия химической реакции, определяется из уравнения нестационарной теплопроводности

$$\rho_{\text{цо}} C_{\text{цо}} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_{\text{цо}} C_{\text{цо}} \vec{\mathbf{u}} \nabla T - \nabla\left(\lambda_{\text{цо}} \nabla T_{\text{цо}}\right) = A \rho_{\text{цо}} k_0 \mathrm{e}^{-\frac{E}{RT}} \Delta H, \qquad (1)$$

где $\rho_{\text{цо}}$ – плотность ЦО, кг/м^3; $C_{\text{цо}}$ – удельная теплоемкость ЦО, Дж/(кг·К); $\lambda_{\text{цо}}$ – коэффициент теплопроводности ЦО, Вт/(м·К); ∇ – оператор набла;

ΔH – тепловой эффект химической реакции, Дж; k_0 – предэкспоненциальный коэффициент химической реакции; E – энергия активации химической реакции, кДж/моль; R = 8,31 – универсальная газовая постоянная; $\vec{\mathbf{u}}$ – вектор скорости; T, $T_{\text{цо}}$ – соответственно температура текущая и ЦО, °С; t – текущее время, с; A – амбивалентный коэффициент, принимается исходя из следующего условия:

$$A = \begin{cases} A = 0 & T < T_{0\,\text{р}}; \\ A = 1 & T \geq T_{0\,\text{р}}, \end{cases}$$

где $T_{0\,\text{р}}$ – температура начала химической реакции, К.

Согласно принятому механизму уравнение формальной химической кинетики пиролиза на стадии термохимического разложения ЦО принимает вид

$$\frac{\partial \rho_{\text{цо}}}{\partial \tau} = -\left(k_{0\,\text{г}} e^{\frac{E_{\text{г}}}{RT}} + k_{0\,\text{ж}} e^{\frac{E_{\text{ж}}}{RT}} + k_{0\,\text{тв}} e^{\frac{E_{\text{тв}}}{RT}} \right) \rho_{\text{цо}}, \tag{2}$$

где $k_{0\,\text{г}}$, $k_{0\,\text{ж}}$, $k_{0\,\text{тв}}$ – константы химической реакции, соответственно пирогаза, пирожидкости и твердого осадка соответственно; $E_{\text{г}}$, $E_{\text{ж}}$, $E_{\text{тв}}$ – энергия активации для пирогаза, пирожидкости и твердого осадка соответственно, кДж/моль.

Предэкспонентные множители и значения энергии активации для различных сред приняты в соответствии [12].

Начальные и граничные условия следующие:

$$\begin{aligned} & t = 0: \quad T = T_0, \quad 0 \leq x \leq L; \\ & x = 0: \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \kappa_1 (T_{\text{тн}} - T), \quad t > 0, \quad \kappa_1 > 0; \\ & x = L: \quad +\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \kappa_2 (T_{\text{тн}} - T), \quad t > 0, \kappa_2 > 0, \end{aligned} \tag{3}$$

где L – длина активной зоны реактора; $T_{\text{тн}}$ – температура теплоносителя; κ_1, κ_2 – коэффициенты теплоотдачи.

Рассмотрим расчетную схему, представленную на рис. 3.

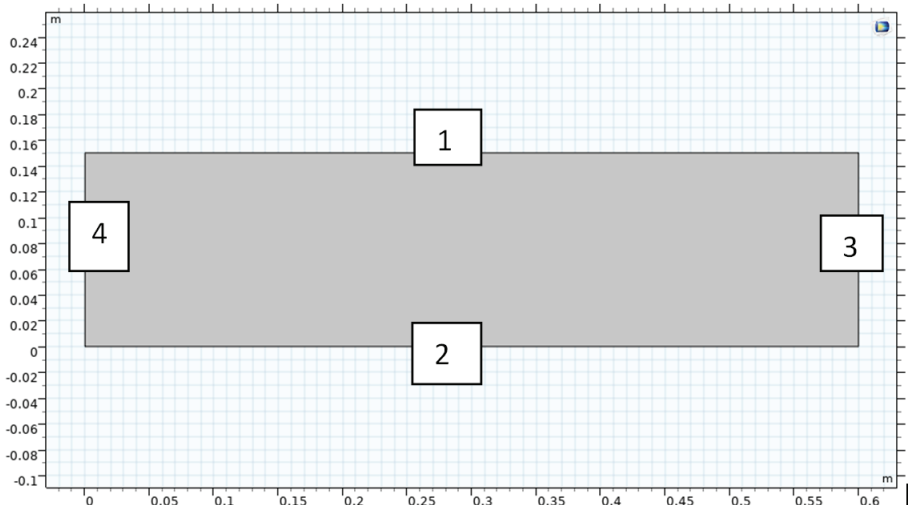


Рис. 3. Расчетная схема

В качестве исходных предположений математической модели приняты следующие предположения и допущения:

– течение ламинарное, давление избыточное – течение напорное;

– зоны 1 и 2 – твердая стенка, 3 – вход, 4 – выход;

– в зонах 1, 2 реализуется конвективный теплообмен с дымовыми газами (горячий теплоноситель); 3 – температура среды; 4 – сток тепла (нулевой поток);

– тепловой эффект реакции (порог срабатывания по температуре и все параметры реальные более или менее).

Для расчета поля скоростей среды добавим уравнение Навье–Стокса для несжимаемой жидкости (4), а также уравнение неразрывности (5)

$$\rho\frac{\partial\vec{\mathbf{u}}}{\partial t}+\rho(\vec{\mathbf{u}}\nabla)\vec{\mathbf{u}}=\nabla\left[-p\vec{\mathbf{I}}+\mu\left(\nabla\vec{\mathbf{u}}+(\nabla\vec{\mathbf{u}})^{\mathrm{T}}\right)\right], \tag{4}$$

где p – давление, Па; μ – динамическая вязкость осредненная динамическая вязкость, Па·с; $\mathbf{I}$ – единичный тензор.

$$\nabla(\rho\vec{\mathbf{u}})=0. \tag{5}$$

Начальные условия:

$$\vec{\mathbf{u}}=0;\ \ p=0. \tag{6}$$

Граничное условие на входе в реактор (зона 3)

$$\vec{\mathbf{u}}=-U_0\vec{\mathbf{n}}, \tag{7}$$

где U_0 – линейная скорость подачи сырья, м/с; $\vec{\mathbf{n}}$ – вектор нормали к зоне 3.

Граничное условие на выходе из реактора (зона 4)

$$\left[-p\vec{\mathbf{I}}+\mu\left(\nabla\vec{\mathbf{u}}+(\nabla\vec{\mathbf{u}})^{\mathrm{T}}\right)\right]\vec{\mathbf{n}}=-p_0\vec{\mathbf{n}}, \tag{8}$$

где p_0 – атмосферное давление, Па.

Для численного решения системы (1) – (8) использован сеточно-характеристический метод на тетраэдральных сетках посредством программы COMSOL Multiphysics, позволяющий строить корректные численные алгоритмы для расчета граничных точек и точек, лежащих на поверхностях раздела двух сред с разными параметрами и плотностями. На каждом шаге интегрирования по времени выбираются три произвольных направления, образующие базис, что обеспечивает изотропность метода. Тетраэдальная сетка модели представлена на рис. 4.

В качестве результатов получены поля распределения температур и скоростей среды (рис. 5).

Сопоставление результатов численного эксперимента позволили получить соответствие усредненных по объему реактора скоростей и температур, представленных на рис. 6.

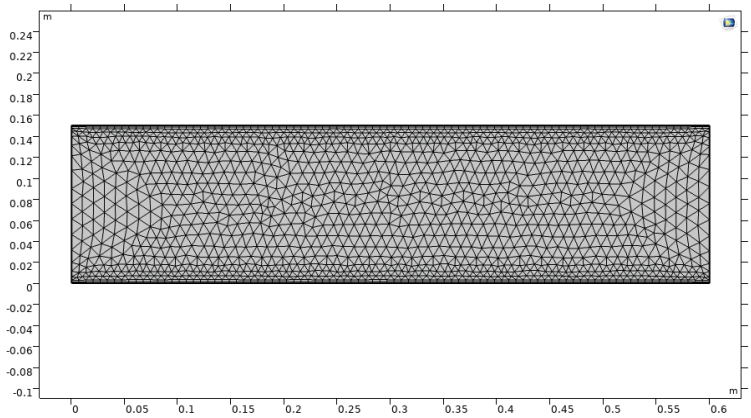
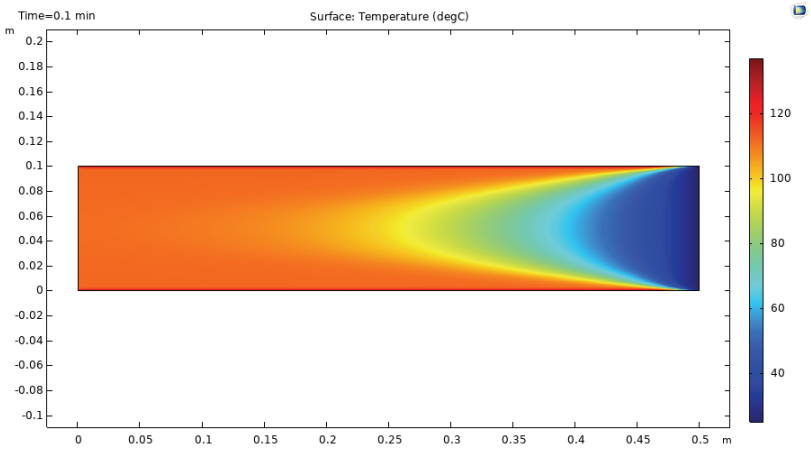
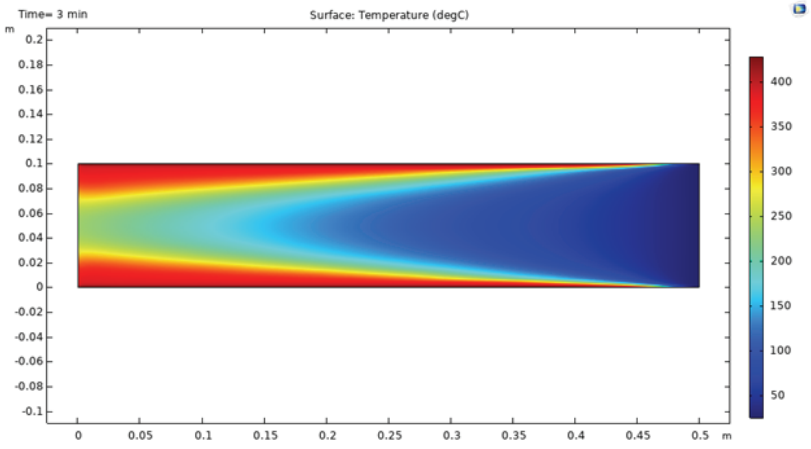


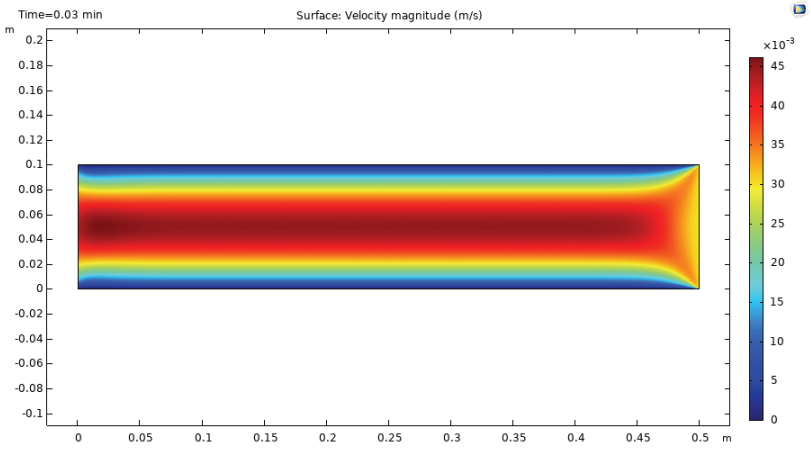
Рис. 4. Тетраэдальная сетка модели



а)



б)



в)

Рис. 5. Скалярные поля температур (*а*, *б*) и скоростей (*в*) конвективного потока: *а* – t = 0,1 мин; *б* – t = 3 мин

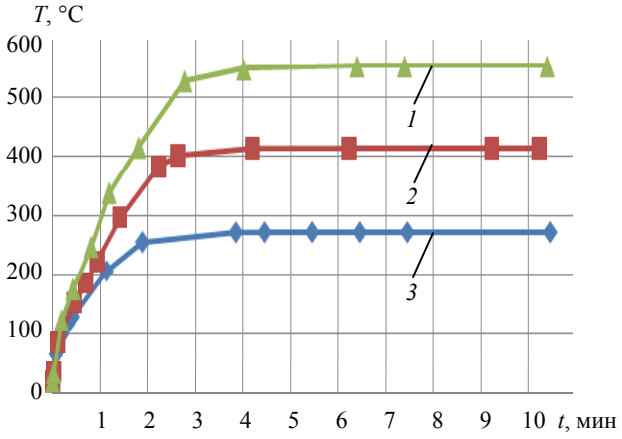


Рис. 6. Динамика изменения среднеобъемной температуры от скорости перемещения среды, м/мин:
1 – 2,4; *2* – 3,0; *3* – 3,6;

Полученные при помощи численного моделирования результаты достаточно согласуются со значениями натурного эксперимента. Данные, представленные на рис. 7, позволяют выбрать оптимальное значение линейного перемещения материала в корпусе реактора в зависимости от требуемого режима химико-термической переработки целлюлозосодержащих отходов и соответственно и частоту вращения вала реактора.

На основании полученных данных можно сделать вывод о корректности постановки задачи и успешной верификации модели в рамках рассмотренной проблемы.

Список литературы

1. Маркетинговое исследование российского рынка переработки пищевых отходов и оборудования для переработки пищевых отходов. – Текст : электронный // Аналитический обзор компании Research Tech Art. – URL : https://research-techart.ru/files/research/food_waste-report.pdf (дата обращения: 20.08.2020).

2. Исследования по утилизации и переработке отходов производства пищевых и кормовых продуктов / М. Ю. Балабанова, Е. В. Скляднев, А. В. Зинковский [и др.] // Междунар. науч. вестн. (Вестн. Объединения православных ученых). – 2016. – № 3 (11). – С. 59 – 63.

3. Пат. 2375636 Российская Федерация, МПК F23G 5/44. Реактор для термической переработки органических отходов / Ю. Н. Шаповалов, А. Н. Ульянов, В. П. Комаров, Э. Н. Куфа, О. Н. Гусаров, С. Ю. Панов ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Воронежская государственная технологическая академия». – № 2008121431/03 ; заявл. 27.05.2008 ; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 34. – 5 с.

4. Pyrolytic Processing of Cellulose-Containing Wastes from Food Industry Plants / E. V. Sklyadnev, A. N. Ryazanov, S. Yu. Panov [et al.] // Chemical and Petroleum Engineering. – 2016. – Vol. 52, Issue 5-6. – P. 419 – 424.

5. Исследование процесса пиролизной переработки целлюлозосодержащих отходов предприятий пищевой промышленности / Е. В. Скляднев, А. Н. Рязанов, С. Ю. Панов [и др.] // Хим. и нефтегаз. машиностроение. – 2016. – № 6. – С. 35 – 39.

6. Lautenberger, Ch. W. A Generalized Pyrolysis Model for Combustible Solids : dis. … of Doctor of Engineering Sciences / Lautenberger Christopher William. – Fall, 2007. – 366 p.

7. Lautenberger, C. A Model for the Oxidative Pyrolysis of Wood / C. Lautenberger, C. Fernandez-Pello // Combustion and Flame. – 2009. – No. 156, Issue 8. – P. 1503 – 1513.

8. Liu, N. Thermal Decomposition of Pine Branch: Unified Kinetic Model on Pyrolytic Reactions in Pyrolysis and Combustion / N. Liu, H. Niu // Fuel. – 2015. – No. 160. – P. 339 – 345.

9. Conesa, J. A. Biomasses Pyrolysis and Combustion Kinetics Through n-th Order Parallel Reactions / J. A. Conesa, A. Domene // Thermochimica Acta. – 2011. – No. 523, Issue 1-2. – P. 176 – 181.

10. Din, Y. Modeling the Pyrolysis of Wet Wood using Fire FOAM / Y. Din, C. Wang, S. Lu // Energy Conversion and Management. – 2015. – No. 98. – P. 500 – 506.

11. Modeling Pyrolysis of Wet Wood under External Heat Flux / D. K. Shen, M. X. Fang, Z. Y. Luo, K. F. Cen // Fire Safety Journal. – 2007. – Vol. 42, Issue 3. – P. 210 – 217.

12. Hagge, M. J. Modeling the Impact of Shrinkage on the Pyrolysis of Dry Biomass / M. J. Hagge, K. M. Bryden // Chemical Engineering Science. – 2002. – Vol. 57, Issue 14. – P. 2811 – 2823.

Modeling the Process of Chemical-Thermal Processing of Cellulose-Containing Materials

M. Yu. Balabanova[1], S. Yu. Panov[2], A. A. Khvostov[3]

Department of Industrial Ecology, Chemical Equipment and Petrochemical Industries, Voronezh State University of Engineering Technologies (1);
Department of Mathematics, su-panov@yandex.ru;
Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professors N. Ye. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin" (2);
Department of Applied Mathematics and Mechanics, Voronezh State Technical University (3), Voronezh, Russia

Keywords: kinetics of pyrolysis; mathematical model; pyrogas; pyrolysis; heat and mass transfer; chemical thermal processing; cellulose.

Abstract: The issues of numerical modeling of chemical-thermal processing of cellulose-containing waste are considered. The simulation results are presented in comparison with the data of experiments carried out in a horizontal pyrolysis reactor with a turner at various process temperatures. The process and the resulting products are influenced by the factors of the mixing rate of the products in the reactor core and the temperature distribution in this zone. To describe the thermal processes and chemical kinetics of cellulose pyrolysis, a model proposed by Yu. Dean was chosen, in which the process is represented by a heterogeneous n-order reaction and the Arrhenius equation. It is assumed that the process of heat transfer during pyrolysis takes place inside a horizontal tube of circular cross-section under conditions of free convection in a limited volume, which has an excess temperature in relation to the surrounding space. It is shown that the results obtained with the help of numerical modeling make it possible to choose the most optimal value of the linear movement of the material in the reactor vessel, depending on the required mode of chemical-thermal processing of cellulose-containing waste.

References

1. https://research-techart.ru/files/research/food_waste-report.pdf (accessed 20 August 2020).
2. Balabanova M.Yu., Sklyadnev Ye.V., Zinkovskiy A.V., Shakhov S.V., Panov S.Yu. [Research on utilization and processing of waste products from food and feed production], *Mezhdunarodnyy nauchnyy vestnik (Vestnik Ob"yedineniya pravoslavnykh uchenykh)* [International Scientific Bulletin (Bulletin of the Association of Orthodox Scientists)], 2016, no. 3 (11), pp. 59-63. (In Russ.)
3. Shapovalov Yu.N., Ul'yanov A.N., Komarov V.P., Kufa E.N., Gusarov O.N., Panov S.Yu. *Reaktor dlya termicheskoy pererabotki organicheskikh otkhodov* [Reactor for thermal processing of organic waste], Russian Federation, 2009, Pat. 2375636. (In Russ.)
4. Sklyadnev E.V., Ryazanov A.N., Panov S.Yu., Balabanova M.Yu., Zinkovskii A.V. Pyrolytic Processing of Cellulose Containing Wastes from Food Industry Plants, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2016, vol. 52, issue 5-6, pp. 419-424.
5. Sklyadnev Ye.V., Ryazanov A.N., Panov S.Yu., Balabanova M.Yu., Zinkovskiy A.V. [Investigation of the pyrolysis process of cellulose-containing waste products from food industry enterprises], *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2016, no. 6, pp. 35-39. (In Russ.)
6. Lautenberger Ch.W. *PhD Dissertation* (*Engineering*), Fall, 2007, 366 p.
7. Lautenberger C., Fernandez-Pello C. A Model for the Oxidative Pyrolysis of Wood, *Combustion and Flame*, 2009, vol. 156, issue 8, pp. 1503-1513.
8. Liu N., Niu H. Thermal Decomposition of Pine Branch: Unified Kinetic Model on Pyrolytic Reactions in Pyrolysis and Combustion, *Fuel*, 2015, no. 160, pp. 339-345.
9. Conesa J.A., Domene A. Biomasses Pyrolysis and Combustion Kinetics Through n-th Order Parallel Reactions, *Thermochimica Acta*, 2011, no. 523, issue 1-2, pp. 176-181.
10. Din Y., Wang C., Lu S. Modeling the Pyrolysis of Wet Wood using Fire FOAM, *Energy Conversion and Management*, 2015, no. 98, pp. 500-506.
11. Shen D.K., Fang M.X., Luo Z.Y., Cen K.F. Modeling Pyrolysis of Wet Wood under External Heat Flux, *Fire Safety Journal*, 2007, vol. 42, issue 3, pp. 210-217.
12. Hagge M.J., Bryden K.M. Modeling the Impact of Shrinkage on the Pyrolysis of Dry Biomass, *Chemical Engineering Science*, 2002, vol. 57, issue 14, pp. 2811-2823.

Simulation des chemisch-thermischen Prozesses der Verarbeitung von zellstoffhaltigen Materialien

Zusammenfassung: Es sind die Fragen der numerischen Modellierung der chemisch-thermischen Verarbeitung von zellulosehaltigen Abfällen betrachtet. Die Simulationsergebnisse sind im Vergleich zu den Daten von Experimenten dargestellt, die in einem horizontalen Pyrolysereaktor mit einem Mischrührwerk bei verschiedenen Prozesstemperaturen durchgeführt worden sind. Der Prozess und die resultierenden Produkte werden durch die Faktoren der Mischgeschwindigkeit der Produkte im Reaktorkern und der Temperaturverteilung in dieser Zone beeinflusst. Um die thermischen Prozesse und die chemische Kinetik der Cellulosepyrolyse zu beschreiben, wurde das von Yu. Dean vorgeschlagene Modell gewählt, bei dem der Prozess durch eine heterogene Reaktion *n*-Ordnung und die Arrhenius-Gleichung dargestellt wird. Es ist angenommen, dass der Prozess der Wärmeübertragung während der Pyrolyse in einem horizontalen Rohr mit kreisförmigem Querschnitt unter Bedingungen freier Konvektion in einem begrenzten Volumen stattfindet, das im

Verhältnis zum umgebenden Raum eine Übertemperatur aufweist. Es ist gezeigt, dass die mit Hilfe der numerischen Modellierung erhaltenen Ergebnisse es ermöglichen, den optimalsten Wert der linearen Bewegung des Materials im Reaktorgefäß in Abhängigkeit von der erforderlichen Art der chemisch-thermischen Verarbeitung von zellulosehaltigen Abfällen auszuwählen.

Modélisation du processus du traitement chimique et thermique des matériaux contenant de la cellulose

Résumé: Sont examinées les questions de la modélisation numérique du traitement chimique et thermique des déchets cellulosiques Les résultats de la modélisation sont comparés aux expériences réalisées dans un réacteur de pyrolyse horizontal avec un agitateur à différentes températures du processus. Les facteurs de la vitesse du mélange des produits dans le cœur du réacteur et la répartition de la température dans cette zone influent sur le processus et les produits obtenus. Pour décrire les processus thermiques et la cinétique chimique de la pyrolyse de la cellulose, est choisi le modèle proposé par Yu. Dean dans lequel le processus est représenté par une réaction hétérogène d'ordre *n* et l'équation d'Arrhenius. Est admis que le processus de transfert de chaleur lors de la pyrolization se déroule à l'intérieur d'un tube horizontal de section circulaire dans des conditions de convection libre dans un volume limité, ayant une température excessive par rapport à l'espace environnant. Est démontré que les résultats de la simulation numérique permettent de choisir la valeur la plus optimale du mouvement linéaire du matériau dans le boîtier du réacteur en fonction du mode de traitement chimique et thermique requis des déchets contenant de la cellulose.

Авторы: ***Балабанова Мария Юрьевна*** **–** ассистент кафедры промышленной экологии, оборудования химических и нефтехимических производств, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»; ***Панов Сергей Юрьевич*** **–** доктор технических наук, профессор кафедры математики, ФГКВОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»; ***Хвостов Анатолий Анатольевич*** **–** доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики и механики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия.

Рецензент: ***Гатапова Наталья Цибиковна*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

УДК 66.021.2.065.5
DOI: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.431-436

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КРИСТАЛЛИЗАТОРА ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Н. В. Орлова[1], Е. Б. Александров[2], А. М. Щербакова[1], А. Ю. Орлов[3]

Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», kvidep@cen.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ» (1), г. Тамбов, Россия; Высшая школа сервиса, ФГБОУ ВО «Российский государственный университет туризма и сервиса» (2), Московская обл., Россия; отдел АСУТП, АО «Газпром газораспределение Тамбов» (3), г. Тамбов, Россия

Ключевые слова: кристаллизация; сульфаминовая кислота; гранулометрический состав; насыпная плотность; растворимость.

Аннотация: На основе математической модели совмещенного процесса кристаллизации и химической реакции разработана инженерная методика расчета процесса кристаллизации на примере водного раствора целевого вещества 4,4'-ди-[4"-хлор-6"-(*п*-сульфоанилино)-симметричный триазин-2"-иламино]-стильбен-2, 2'-дисульфокислоты тетранатриевой соли (натриевая соль белофора).

В технологии производства оптического отбеливателя ОБ-жидкого в результате химической реакции тетранатриевой соли 4,4'-ди-[4"-хлор-6"-(*п*-сульфоанилино)-симметричный триазин-2"-иламино]-стильбен-2, 2'-дисульфокислоты (натриевая соль белофора) с кислотой (выкисляющим агентом) образуется 4,4'-ди-[4"-хлор-6"-(*п*-сульфоанилино)-симметричный триазин-2"-иламино]-стильбен-2, 2'-дисульфокислоты (кислая форма белофора), выпадающая в осадок в виде кристаллов.

Следуя механизму процесса, в растворе в результате химической реакции образуется новое соединение (кислая форма белофора), концентрация которого оказывается выше его растворимости в данном растворе, следовательно, раствор оказывается пересыщенным по отношению к образовавшемуся веществу. Непосредственно процесс кристаллизации, состоящий из зародышеобразования и роста кристаллов, может быть описан с применением формальных уравнений кинетики химических реакций [1].

Исходя из того, что в реакторе-кристаллизаторе периодического действия осуществляется гидродинамический режим идеального смешения, то, на основании математического описания разработанного авторами [2], система уравнений будет включать следующие уравнения: сохранения вещества в растворе, сохранения кристаллической фазы, теплового баланса, материального баланса, а также начальные и граничные условия.

К входным параметрам относятся:

– мольная концентрация соли белофора в начале процесса, кмоль/м^3;
– скорость подачи выкисляющего агента, кг/с;
– время химической реакции, с;
– температура процесса, К;
– объем реакционной массы, м^3.

Также должны учитываться физико-химические и теплофизические свойства исходных веществ и конечного продукта:

– плотность твердой фазы, кг/м^3;

– молярная масса компонентов, кг/кмоль;

– теплоемкость раствора, Дж/(кг·К);

– теплоемкость твердой фазы, Дж/(кг·К);

– теплота кристаллизации, кДж/кг.

Выходными параметрами математического описания являются:

– концентрация натриевой соли белофора, кмоль/м^3;

– концентрация выкисляющего агента, кмоль/м^3;

– плотности смеси, кг/м^3;

– скорость зародышеобразования, шт. кристаллов/с;

– объемная скорость роста кристалла, м^3/с.

Математическое описание включает:

– кинетику химической реакции;

– уравнения, описывающие скорость зародышеобразования;

– кинетику роста одиночного кристалла;

– распределение кристаллов по размеру во времени;

– уравнения, описывающие изменение концентрации кристаллизуемого вещества во времени;

– уравнения материального и теплового балансов кристаллизации оптического отбеливателя ОБ, осложненной химической реакцией.

Система принятых допущений математического описания процесса кристаллизации, осложненной химической реакцией:

1) измельчением кристаллов при движении рабочей среды пренебрегаем;

2) агломерация кристаллов отсутствует;

3) продолжительность процесса кристаллизации может быть представлена как множество достаточно малых интервалов времени, на которых скорость роста кристалла можно принять постоянной;

4) градиенты температур и концентрации растворенного вещества по кристаллизационному объему отсутствуют (гидродинамический режим в аппарате – идеальное смешение);

5) при образовании кислой формы оптического отбеливателя ОБ в результате химической реакции образование побочных веществ отсутствует.

Исходя из вышеизложенного, предлагается следующая методика инженерного расчета процесса кристаллизации, осложненной химической реакцией.

1. Задание исходных данных, необходимых для выполнения расчета:

$C_{\text{ОБNa}}^{m_0}$ – начальная концентрация соли белофора, кмоль/м^3; τ – время процесса, с; T – температура процесса, К; $V_{\text{р.м}}$ – объем реакционной массы, м^3; $\rho_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{тв}}$ – плотности жидкой и твердой фаз, кг/м^3, соответственно; M_i – молярная масса компонентов, кг/кмоль; K, $K_{\text{з}}$, $K_{\text{кр}}$ – константы скоростей химической реакции, зародышеобразования и роста кристалла, 1/с, соответственно; E – энергия активации, кДж/моль.

2. Определение шага по времени проведения процесса и решение системы уравнений (1) – (4)

$$\frac{dC_{\text{ОБК}}^{m_{\text{х.р}}}}{d\tau} = -K \exp\left(-\frac{E_{\text{ВН}}}{RT}\right)\left(C_{\text{ОБNa}}^{m}\right)^{n_{\text{ОБNa}}}\left(C_{\text{ВН}}^{m}\right)^{n_{\text{ВН}}}; \quad (1)$$

$$x_{\text{ВН}}^{\text{р.м}} = \int_0^{\tau_{\text{х.р}}} \frac{G_{\text{ВН}}(\tau)}{M_{\text{р.м}}} d\tau_{\text{х.р}}; \tag{2}$$

$$C_{\text{ОБNa}}^{m} = C_{\text{ОБNa}}^{m_0} - \int_0^{\tau_{\text{х.р}}} \frac{dC_{\text{ОБК}}^{m_{\text{х.р}}}}{d\tau_{\text{х.р}}} d\tau; \tag{3}$$

$$C_{\text{ВН}}^{m} = \int_0^{\tau_{\text{х.р}}} \left(\frac{\rho_{\text{ж}}}{M_{\text{р.м}}^0 + G_{\text{ВН}}(\tau)} \frac{G_{\text{ВН}}(\tau) x_{\text{ВН}}}{M_{\text{ВН}}} - 4 \frac{dC_{\text{ОБК}}^{m_{\text{х.р}}}}{d\tau_{\text{х.р}}} \right) d\tau, \tag{4}$$

где $G_{\text{ВН}}$ – расход выкисляющего агента, кг/с;
при уравнениях связи (5) – (9)

$$C_i = \frac{C_i^m M_i}{\rho_{\text{ж}}}; \tag{5}$$

$$\frac{dC_{\text{ОБК}}^{\text{х.р}}}{d\tau_{\text{х.р}}} = \frac{dC_{\text{ОБК}}^{m_{\text{х.р}}}}{d\tau} \frac{M_{\text{ОБК}}}{\rho_{\text{ж}}}; \tag{6}$$

$$C_{\text{ОБNa}}^{m}\Big|_{d\tau_{\text{х.р}}=0} = C_{\text{ОБNa}}^{m_0}; \tag{7}$$

$$C_{\text{ВН}}^{m}\Big|_{d\tau_{\text{х.р}}=0} = 0; \tag{8}$$

$$G_{\text{ВН}}^{m} = \frac{G_{\text{ВН}}(\tau_{\text{х.р}}) c_{\text{ВН}}}{M_{\text{ВН}}}, \tag{9}$$

где $c_{\text{ВН}}$ – теплоемкость выкисляющего агента, Дж/(кг·К),
и нахождение концентраций натриевой соли белофора $C_{\text{ОБNa}}^{m}$, кислой формы белофора $C_{\text{ОБК}}^{m}$, выкисляющего агента в реакционной массе $C_{\text{ВН}}^{m}$; массовой доли выкисляющего агента в реакционной смеси $x_{\text{ВН}}^{\text{р.м}}$.

3. Нахождение плотности смеси $\rho_{\text{см}}$

$$\frac{1}{\rho_{\text{см}}} = \frac{1}{\rho_{\text{ж}}^0} + \frac{1}{\rho_{\text{ВН}}} \int_0^{\tau_{\text{х.р}}} \frac{G_{\text{ВН}}}{M_{\text{р.м}}} d\tau_{\text{х.р}}. \tag{10}$$

4. Расчет концентрации кислой формы белофора в процессе зародышеобразования $C_{\text{з}}^{m}$

$$\frac{dC_{\text{з}}^{m}}{d\tau} = K_{\text{з}} \exp\left(-\frac{E_{\text{з}}}{RT}\right) \left(\frac{C_{\text{ОБК}}^{m} - C_{\text{ОБК}}^{*}}{C_{\text{ОБК}}^{*}} \right)^{n_{\text{з}}}, \tag{11}$$

где $C_{\text{ОБК}}^{*}$ – равновесная концентрация кислой формы белофора, кмоль/м^3.

5. Расчет скорости зародышеобразования $I_{\text{з}}$

$$I_{\text{з}} = \frac{M_{\text{ОБК}}}{\rho_{\text{тв}} V_{\text{з}}} V_{\text{р.м}} \frac{dC_{\text{з}}^{m}}{d\tau}. \tag{12}$$

6. Расчет концентрации реакционной массы в процессе роста кристаллов $C_{\text{кр}}^{m}$

$$\frac{dC_{\text{кр}}^{m}}{d\tau} = K_{\text{кр}} \exp\left(-\frac{E_{\text{кр}}}{RT}\right)\left(\frac{C_{\text{ОБК}}^{m} - C_{\text{ОБК}}^{*}}{C_{\text{ОБК}}^{*}}\right)^{n_{\text{кр}}}. \quad (13)$$

7. Расчет скорости роста кристаллов η

$$\eta = \frac{dC_{\text{кр}}^{m}}{d\tau} V_{\text{р.м}}(\tau) \frac{M_{\text{ОБК}}}{\rho_{\text{тв}}}. \quad (14)$$

8. Решение системы уравнений (15) – (18)

$$\rho_{\text{ж}} \frac{dC_{\text{ОБК}}^{\text{кр}}}{d\tau} = C_{\text{ОБК}} \left[\int_{V_{\text{з}}}^{V_{\max}} \rho_{\text{тв}} f(V_{\text{тв}}, \tau) \eta dV_{\text{тв}} + \rho_{\text{тв}} V_{\text{з}} I_{\text{з}} \right]; \quad (15)$$

$$\frac{d\rho_{\text{ж}}}{d\tau} = -\int_{V_{\text{з}}}^{V_{\max}} \rho_{\text{тв}} f(V_{\text{тв}}, \tau) \eta dV_{\text{тв}} - \rho_{\text{тв}} V_{\text{з}} I_{\text{з}}; \quad (16)$$

$$\int_{V_{\text{з}}}^{V_{\max}} \rho_{\text{тв}} f(V_{\text{тв}}, \tau) \eta dV_{\text{тв}} + \rho_{\text{тв}} V_{\text{з}} I_{\text{з}} = 0; \quad (17)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} f(V_{\text{тв}}, \tau) + \eta \frac{\partial f(V_{\text{тв}}, \tau)}{\partial V_{\text{тв}}} = 0, \quad (18)$$

при уравнениях связи

$$\begin{aligned} &c_{\text{ж}}\left(\tau_{\text{кр}}^{0}\right) = 0;\ \rho_{\text{ж}}\left(\tau_{\text{кр}}^{0}\right) = \rho_{\text{ж}}^{0};\ T\left(\tau_{\text{кр}}^{0}\right) = T_0; \\ &f\left(V, \tau_{\text{кр}}^{0}\right) = 0;\ f\left(V_{\text{з}}, \tau_{\text{кр}}^{0}\right) = \frac{I_{\text{з}}}{\eta(V_{\text{з}})}, \end{aligned} \quad (19)$$

где $c_{\text{ж}}$ – теплоемкость раствора, Дж/(кг·К),
и нахождение объема выделившейся твердой фазы $V_{\text{тв}}$, функции распределения кристаллов по объему $f(V_{\text{тв}}, \tau)$.

9. Расчет линейной скорости роста и радиуса кристалла

$$\frac{\eta}{N_{\text{кр}}} = \frac{4\pi}{3}(\ell)^3, \quad (20)$$

где ℓ – геометрический размер кристалла, м;

$$r = r_0 + \left(\frac{3}{4\pi N_{\text{кр}}}\right)^{1/3} \int_0^{\tau} (\eta(\tau))^{1/3} d\tau. \quad (21)$$

10. Диаметр кристаллизатора $D_{\text{к}}$ определяется из производительности установки по кристаллической фазе $V_{\text{тв}}$

$$D_{\text{к}} = \sqrt{\frac{4V_{\text{тв}}}{\pi \eta}}. \quad (22)$$

Таким образом, число образующихся кристаллов, их размер и форма в значительной мере определяются скоростями их зарождения и роста, существенно зависящими от физико-химических свойств смеси, ее состава, температуры процесса, интенсивности перемешивания и режима работы кристаллизатора.

Список литературы

1. Хамский, Е. В. Кристаллизация в химической промышленности / Е. В. Хамский. – М. : Химия, 1986. – 343 с.

2. Кафаров, В. В. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы массовой кристаллизации из растворов и газовой фазы / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов, Э. М. Кольцова. – М. : Наука, 1983. – 368 с.

3. Ященко, А. Г. Исследование процесса кристаллизации сульфаминовой кислоты с улучшением качественных показателей / А. Г. Ященко, Н. В. Орлова, Н. В. Пятакова // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2, № 6 (11). – С. 273 – 278. doi: 10.12737/6865

4. Ященко, А. Г. Исследование процесса кристаллизации сульфаминовой кислоты / А. Г. Ященко, Н. В. Орлова, Н. В. Пятакова // Theoretical & Applied Science. – 2014. – № 7 (15). – С. 43 – 45.

5. Improvement of Crystallisation Stage in Production of Sulfamic Acid / N. V. Orlova, A. G. Yashchenko, A. Yu. Orlov [et al.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 4. – С. 780 – 786.

A Method for Calculating a Batch Crystallizer

N. V. Orlova[1], E. B. Aleksandrov[2], A. M. Shcherbakova[1], A. Yu. Orlov[3]

Department of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety, kvidep@cen.tstu.ru; TSTU (1), Tambov, Russia;
Higher School of Service, Russian State University of Tourism and Service (2), Moscow Region, Russia;
Department of Automated Process Control System, JSC "Gazprom Gazoraspredelenie Tambov" (3), Tambov, Russia

Keywords: crystallization; sulfamic acid; grading; bulk density; solubility.

Abstract: On the basis of a mathematical model of a combined crystallization process and a chemical reaction, an engineering method for calculating the crystallization process was developed using the example of an aqueous solution of the target substance 4,4'-di-[4"-chlor-6"-(*n*-sulfoanilino)-symmetric triazine-2"-ylamino]-stilbene-2, 2'-disulfonic acid of tetrasodium salt (sodium salt of Belofor).

References

1. Khamskiy Ye.V. *Kristallizatsiya v khimicheskoy promyshlennosti* [Crystallization in the chemical industry], Moscow: Khimiya, 1986, 343 p. (In Russ.)

2. Kafarov V.V., Dorokhov I.N., Kol'tsova E.M. *Sistemnyy analiz protsessov khimicheskoy tekhnologii. Protsessy massovoy kristallizatsii iz rastvorov i gazovoy fazy* [System analysis of chemical technology processes. Processes of mass crystallization from solutions and gas phase], Moscow: Nauka, 1983, 368 p. (In Russ.)

3. Yashchenko A.G., Orlova N.V., Pyatakova N.V. [Study of the crystallization process of sulfamic acid with improved quality indicators], *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2014, vol. 2, no. 6 (11), pp. 273-278, doi: 10.12737/6865 (In Russ.)

4. Yashchenko A.G., Orlova N.V., Pyatakova N.V. [Research of the crystallization process of sulfamic acid], *Theoretical & Applied Science*, 2014, no. 7 (15), pp. 43-45. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Orlova N.V., Yashchenko A.G., Orlov A.Yu., Koliukh A.N., Pshichkina D.Yu. Improvement of Crystallisation Stage in Production of Sulfamic Acid, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 4, pp. 780-786. (In Eng., abstract in Russ.)

Verfahren zur Berechnung des Rührwerkskristallisators

Zusammenfassung: Es ist auf der Grundlage des mathematischen Modells des kombinierten Kristallisationsprozesses und der chemischen Reaktion die technische Methode zur Berechnung des Kristallisationsprozesses am Beispiel einer wässrigen Lösung der Zielsubstanz 4,4'-Di-[4"-chlor-6"-(*n*-sulfoanilino)-symmetrisches Triazin-2"-ylamino]-stilben-2,2'-disulfonsäure von Tetranatriumsalz (Natriumsalz von Belofor) entwickelt.

Méthode de calcul du cristalliseur de l'action périodique

Résumé: A la base d'un modèle mathématique combiné des processus de la solidification et de la réaction chimique est développée la méthode de calcul du processus de la cristallisation à l'exemple d'une solution aqueuse cible de la substance 4,4'-di-[4"-chlorure-6"-(*n*-sulfo-aniline)-symétrique triazine-2"-ilamino]-stylbène-2, 2'-acide disulphonique tétrasodique de sel (sel de sodium de belophore).

Авторы: ***Орлова Наталия Вячеславовна*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; ***Александров Евгений Борисович*** – кандидат технических наук, доцент высшей школы сервиса, ФГБОУ ВО «Российский государственный университет туризма и сервиса», Московская обл., Россия; ***Щербакова Алина Михайловна*** – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; ***Орлов Андрей Юрьевич*** – кандидат технических наук, начальник отдела АСУТП АО «Газпром газораспределение Тамбов», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: ***Дьячкова Татьяна Петровна*** **–** доктор химических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

УДК 517.518
DOI: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.437-449

МЕТОДЫ ПОЛИНОМИЗАЦИИ ФУНКЦИЙ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ

А. Д. Нахман

Кафедра «Высшая математика», alextmb@mail.ru;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия

Ключевые слова: квазивыпуклые последовательности; ряды Фурье–Чебышева; суммируемость полунепрерывными методами.

Аннотация: Изучается класс полунепрерывных квазивыпуклых методов суммирования рядов Фурье–Чебышева. Получены верхние оценки норм соответствующих операторов в пространстве непрерывных функций. Установлена сходимость средних в метрике пространства. Рассмотрена также суммируемость в точках разрыва первого рода. Предложены процессы восстановления функций по заданной последовательности степенных моментов. Указаны пути обобщения результатов и их распространения на случай суммируемости в точках Лебега.

Введение

Вопросы представления функций действительного переменного бесконечными полиномами представляют значительный интерес как сами по себе, так и в связи с многочисленными приложениями [1]. Если ограничиться рассмотрением функций, непрерывных на некотором отрезке, то средством для таких разложений служат классические ортогональные полиномы [2]. В качестве наиболее простого «опосредованного» инструмента разложений могут быть использованы тригонометрические полиномы, которые простой заменой переменных трансформируются затем в суммы по системе многочленов Чебышева. Однако, в связи с известными примерами расходящихся тригонометрических рядов Фурье, здесь нельзя ограничиваться рассмотрением частичных сумм таких рядов. Поэтому на первый план выходит изучение методов суммирования. Многочисленные исследования в этом направлении (см. обзор [3] и библиографию в нем), по сути, сводились к расширению классов суммирующих последовательностей. Как показано в [4], задача «полиномизации» (то есть представления функции бесконечным полиномом) может быть решена, в частности, в терминах обобщенных сумм Фурье по ортогональным полиномам. В настоящей работе мы ограничиваемся разложениями по полиномам Чебышева первого рода. Изучается случай функций $f(x)$, суммируемых на отрезке $[-1, 1]$ с весом $\rho(x) = (1 - x^2)^{-1/2}$ (в частности, непрерывных на этом отрезке). Мы также показываем, как можно восстановить такую функцию, имея в наличии последовательность ее степенных моментов; соответствующая идея вытекает из результатов, полученных Б. П. Осиленкером (см., напр., [5]).

Настоящие результаты основаны на «тригонометрическом» подходе, и все необходимые оценки проводятся непосредственно (см. [4; 6, с. 489]). Кроме того, простейшее условие квазивыпуклости суммирующей последовательности используется лишь в целях краткости изложения, однако справедливы более общие результаты, анонсированные в разделе 7 настоящей работы

1. Постановка задачи о суммируемости рядов Фурье–Чебышева

Рассмотрим систему функций

$$\left\{\frac{1}{\sqrt{\pi}};\ \sqrt{\frac{2}{\pi}}\cos(n\arccos x)\right\},\ n=1,2,... \tag{1.1}$$

Нетрудно проверить, что данная система ортонормированна с весом $\rho(x)=(1-x^2)^{-1/2}$ на отрезке $[-1,1]$. Согласно представлению

$$\cos n\tau = 2^{n-1}\cos^n\tau + \sum_{k=0}^{n-1}\beta_k\cos^k\tau,\ \ n=1,2,..., \tag{1.2}$$

в котором $\{\beta_k\}$ – последовательность некоторых коэффициентов, можно утверждать, что при каждом n

$$p_n(x)=\sqrt{\frac{2}{\pi}}\cos(n\arccos x)$$

есть многочлен n-й степени. Последовательность (1.1) называется системой многочленов Чебышева первого рода [7, с. 40]. Как мы покажем ниже, (1.1) является средством полиномиальной аппроксимации функций в каждой точке непрерывности и равномерной полиномиальной аппроксимации в пространстве непрерывных функций.

Уточним постановку задачи. Рассмотрим произвольную функцию $f=f(x)$, суммируемую на $[-1,1]$ с весом $\rho(x)=(1-x^2)^{-1/2}$, последовательность ее коэффициентов Фурье–Чебышева

$$a_n(f)=\int_{-1}^{1} f(x)p_n(x)\rho(x)dx,\ \ n=0,1,...,$$

и ее ряд Фурье–Чебышева

$$f(x)\sim\sum_{n=0}^{\infty}a_n(f)p_n(x). \tag{1.3}$$

С помощью замены переменных $y=\arccos x$ ряд (1.3) преобразуется в ряд Фурье по косинусам

$$f(\cos y)\sim\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi}f(\cos t)dt+\sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{2}{\pi}\int_0^{\pi}f(\cos t)\cos nt\,dt\right)\cos ny. \tag{1.4}$$

Как известно, тригонометрический ряд Фурье может оказаться расходящимся в точке непрерывности функции f [8, т. 1, с. 470 – 476], в силу чего следует ставить вопрос о суммируемости ряда некоторыми методами. Соответственно, задача о суммируемости переносится на ряды Фурье–Чебышева. Рассмотрим бесконечную (вообще говоря) последовательность

$$\Lambda = \{\lambda_k(h),\ \ h>0,\ \ k=0,1,...;\ \lambda_0(h)=1\} \tag{1.5}$$

и построим семейство Λ -средних ряда (1.4)

$$U_h(f) = U(f,x;\Lambda,h) = \sum_{k=0}^{\infty}\lambda_k(h)a_k(f)p_k(x). \tag{1.6}$$

Если обратиться к представлению (1.4), то семейство (1.6) принимает вид

$$\begin{gathered}U_h(f) = U(f,\cos y;\Lambda,h) = \\ = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} f(\cos t)dt + \sum_{k=1}^{\infty}\lambda_k(h)\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} f(\cos t)\big(\cos k(y+t)+\cos k(y-t)\big)dt = \\ = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(\cos t)dt + \sum_{k=1}^{\infty}\lambda_k(h)\frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(\cos t)\cos k(y-t)dt = \\ = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(\cos(y+t))dt + \sum_{k=1}^{\infty}\lambda_k(h)\frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(\cos(y+t))\cos ktdt = \\ = \lim_{N\to+\infty}\frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(\cos(y+t))\left\{\frac{1}{2}+\sum_{k=1}^{N}\lambda_k(h)\cos kt\right\}dt\end{gathered} \tag{1.7}$$

или

$$\begin{gathered}U_h(f) = U(f,\cos y;\Lambda,h) = \\ = \lim_{N\to+\infty}\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi}\big(f\big(\cos(y+t)\big)+f\big(\cos(y-t)\big)\big)\left\{\frac{1}{2}+\sum_{k=1}^{N}\lambda_k(h)\cos kt\right\}dt.\end{gathered} \tag{1.8}$$

Таким образом, Λ -средние (1.6) ряда Фурье–Чебышева могут быть представлены в тригонометрической форме (1.7) – (1.8), где $y=\arccos x$.

2. Вспомогательные представления и оценки

Рассмотрим ядра Дирихле и Фейера [8, с. 86, 148], соответственно:

$$D_k(t) = \frac{1}{2}+\sum_{\nu=1}^{k}\cos\nu t = \frac{\sin(k+\frac{1}{2})t}{2\sin\frac{1}{2}t},$$

$$F_k(t) = \frac{1}{k+1}\sum_{\nu=0}^{k}D_\nu(t) = \frac{\sin^2\frac{k+1}{2}t}{2(k+1)\sin^2\frac{1}{2}t},\quad F_{-1}(t)\equiv 0.$$

Легко проверить, что при всех $k=0,1,...$

$$D_k(t) = (k+1)F_k(t) - kF_{k-1}(t)\ .$$

Положим $\Delta\lambda_k(h) = \lambda_k(h)-\lambda_{k+1}(h),$ и $\Delta^2\lambda_k(h) = \Delta(\Delta\lambda_k(h))$, $k=0,1,...$. В результате двукратного применения преобразования Абеля последовательно получаем

$$\frac{1}{2}+\sum_{k=1}^{N}\lambda_k(h)\cos kt = \frac{1}{2}+\sum_{k=1}^{N}\lambda_k(h)\big(D_k(t)-D_{k-1}(t)\big)\,dt =$$

$$= \lambda_N(h) D_N(t) + \sum_{k=0}^{N-1} \Delta\lambda_k(h) D_k(t) dt = \lambda_N(h) D_N(t) +$$

$$+ \Delta\lambda_N(h)(N+1) F_N(t) + \sum_{k=0}^{N-1} \Delta^2\lambda_k(h)(k+1) F_k(t) . \qquad (2.1)$$

Значит (см. (1.7)),

$$|U_h(f)| = |U(f, \cos y; \Lambda, h)| \le \frac{1}{\pi} \lim_{N\to+\infty} \left\{ |\lambda_N(h)| \int_{-\pi}^{\pi} |f(\cos(y+t))| \, D_N(t) | dt + \right.$$

$$\left. + |\Delta\lambda_N(h)| (N+1) \int_{-\pi}^{\pi} |f(\cos(y+t))| \, F_N(t) dt \right\} +$$

$$+ \frac{1}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} |\Delta^2\lambda_k(h)| (k+1) \int_{-\pi}^{\pi} |f(\cos(y+t))| \, F_k(t) dt . \qquad (2.2)$$

3. Оценки С-норм семейства средних

Обозначим через $\mathbf{C}_{[-1,1]}$ класс функций $f = f(x)$, непрерывных на $[-1, 1]$. Положим

$$L_h(x) = \sup_{|f|\le 1} |U(f, x; \Lambda, h)| .$$

Согласно (1.7) имеет место оценка $L_h(x) \le L_h$, где

$$L_h = \lim_{N\to+\infty} \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |\frac{1}{2} + \sum_{k=1}^{N} \lambda_k(h) \cos kt) | dt. \qquad (3.1)$$

Как известно [6, с. 486], в случае дискретного h (например, $h = \frac{1}{n+1}$, $n = 0, 1, ...$) и «финитных» методов суммирования

$$\Lambda = \left\{ \lambda_k^n, k = 0, 1, ...; \; n = 0, 1, ...; \; \lambda_0^n = 1; \; \lambda_k^n = 0, k = n+1, \; n+2, ... \right\} \qquad (3.2)$$

семейство L_h превращается в последовательность констант Лебега

$$I_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |\frac{1}{2} + \sum_{k=1}^{n} \lambda_k^n \cos kt) | dt .$$

Для любой $f \in \mathbf{C}_{[-1,1]}$ в случае (3.2) необходимыми и достаточными условиями сходимости последовательности средних к $f(x)$ (при $n \to \infty$) в каждой точке x или равномерно по x являются (см. [6, с. 485]) следующие два условия:

а) равномерная ограниченность I_n;

б) сходимость (1.6) к $f(x)$ для каждой функции $f(x)$ из некоторой замкнутой в пространстве $\mathbf{C}_{[-1,1]}$ системы. Последнее условие равносильно равенству

$$\lim_{n\to\infty} \lambda_k^n = 1, \; k = 0, 1, ...$$

Наш полунепрерывный случай осложняется необходимостью (в общем случае) обоснований предельных переходов под знаком интеграла, поэтому сходимость (1.6) при $h \to +0$ мы установим непосредственно, обобщив рассуждения [8, т. 1, с. 145–146], в частности, получим верхнюю оценку аналога констант Лебега (3.1). Положим

$$\Sigma(\lambda) = \sup_{h>0} \sum_{k=0}^{\infty} | \Delta^2 \lambda_k(h) | (k+1) .$$

Последовательность (1.5) называется квазивыпуклой, если выполнено условие

$$\Sigma(\lambda) < \infty. \tag{3.3}$$

Теорема 3.1. Пусть суммирующая последовательность (1.5) удовлетворяет условиям квазивыпуклости (3.3) и

$$\lambda_k(h) = o(\frac{1}{\ln k}),\ k \to \infty \quad (h > 0). \tag{3.4}$$

Тогда оценка

$$L_h < 1 + 2\Sigma(\lambda) \tag{3.5}$$

выполняется равномерно по h.

Доказательство. Согласно (2.1) получаем

$$L_h \le \frac{1}{\pi} \lim_{N \to +\infty} \left\{ | \lambda_N(h) | \int_{-\pi}^{\pi} |D_N(t)|dt + | \Delta\lambda_N(h) | (N+1) \int_{-\pi}^{\pi} F_N(t)dt \right\} +$$

$$+ \frac{1}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} | \Delta^2 \lambda_k(h) | (k+1) \int_{-\pi}^{\pi} F_k(t)dt. \tag{3.6}$$

Как известно [8, т. 1, с. 115, 148],

$$\int_{-\pi}^{\pi} | D_N(t) |dt \le \text{const} \ln(N+2), \quad \int_{-\pi}^{\pi} F_k(t)dt = \pi ;\ N, k = 0, 1, ...$$

Тогда, в силу (3.4), оценка (3.6) приобретает вид

$$L_h \le \lim_{N \to +\infty} | \Delta\lambda_N(h) | (N+1) + \sum_{k=0}^{\infty} | \Delta^2 \lambda_k(h) | (k+1). \tag{3.7}$$

Далее, с помощью преобразования Абеля, будем иметь

$$\sum_{k=0}^{N} (k+1)\Delta^2 \lambda_k(h) = \lambda_0(h) - \lambda_{N+1}(h) - (N+1)\Delta\lambda_{N+1}(h),\ N = 0, 1, ... ,$$

откуда, с учетом (3.4) и $\lambda_0(h) = 1$, получим

$$\lim_{N \to +\infty} | \Delta\lambda_N(h) | (N+1) \le 1 + \Sigma(\lambda) . \tag{3.8}$$

Теперь оценка (3.5) вытекает из (3.7) и (3.8). Теорема доказана.

4. Суммируемость в точках разрыва первого рода и равномерная суммируемость

Пусть x_0 – точка непрерывности или разрыва первого рода. Положим

$$\theta(x)=\begin{cases}\dfrac{f(x+0)+f(x-0)}{2}, & x\in(-1,1);\\ f(x+0), & x=-1;\\ f(x-0), & x=1.\end{cases}$$

Если $y=\arccos x$, то очевидно, что

$$\theta(\cos y)=\frac{f\big(\cos(y-0)\big)+f\big(\cos(y+0)\big)}{2},\quad y\in[0,\pi].$$

Теорема 4.1. Пусть функция $f(x)$ суммируема на отрезке $[-1,1]$ с весом $\rho(x)=(1-x^2)^{-1/2}$, и для последовательности (1.5) выполнены условия (3.3), (3.4), а также

$$\lim_{h\to+0}\lambda_k(h)=1,\quad k=0,1,\ldots \tag{4.1}$$

Тогда во всякой точке x_0, в которой существует $\theta(x_0)$, имеет место соотношение

$$\lim_{h\to+0}U(f,x_0;\Lambda,h)=\theta(x_0). \tag{4.2}$$

В частности, равенство

$$\lim_{h\to+0}U(f,x_0;\Lambda,h)=f(x_0)$$

выполняется в каждой точке непрерывности функции f.

Кроме того, для всякой $f\in\mathbf{C}_{[-1,1]}$ соотношение

$$\lim_{h\to+0}U(f,x;\Lambda,h)=f(x) \tag{4.3}$$

имеет место равномерно на $[-1,1]$.

Доказательство. Заметим, что

$$\theta(x_0)=\lim_{N\to+\infty}\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi}2\theta(x_0)\left\{\frac{1}{2}+\sum_{k=1}^{N}\lambda_k(h)\cos kt)\right\}dt,$$

поэтому

$$U(f,x_0;\Lambda,h)-\theta(x_0)=$$

$$=\lim_{N\to+\infty}\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi}\{f(\cos(y_0+t))+f(\cos(y_0-t))-2\theta(x_0)\}\left\{\frac{1}{2}+\sum_{k=1}^{N}\lambda_k(h)\cos kt)\right\}dt. \tag{4.4}$$

Изменяя, если нужно, значение $f(\cos y_0)$, можно считать, что $f(\cos y_0)=\theta(\cos y_0)=\theta(x_0)$. В силу определения $\theta(x_0)$, получаем

$$\Psi(t,x_0)=\frac{f(\cos(y_0+t))+f(\cos(y_0-t)}{2}-\theta(x_0)\to 0,\quad t\to 0.$$

Тогда, согласно (4.4), для любого $\varepsilon > 0$ существует $\delta = \delta(\varepsilon) > 0$, такое, что $|\Psi(t, x_0)| < \dfrac{\varepsilon}{1 + 2\Sigma(\lambda)}$ при $|t| < \delta$ и

$$|U(f, x_0; \Lambda, h) - \theta(x_0)| \le$$

$$\le \lim_{N \to +\infty} \left(\frac{\varepsilon}{1 + 2\Sigma(\lambda)} \frac{1}{\pi} \int_0^{\delta} \left| \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^{N} \lambda_k(h) \cos kt \right| dt + \frac{1}{\pi} \int_{\delta}^{\pi} |\Psi(t, x_0)| \left| \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^{N} \lambda_k(h) \cos kt \right| dt \right).$$

В силу оценки (3.5), будем иметь

$$|U(f, x_0; \Lambda, h) - \theta(x_0)| \le \lim_{N \to +\infty} \left(\varepsilon + \frac{1}{\pi} \int_{\delta}^{\pi} |\Psi(t, x_0)| \left| \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^{N} \lambda_k(h) \cos kt \right| dt \right). \qquad (4.5)$$

Далее применим представление (2.1) и очевидные оценки ядер Дирихле и Фейера

$$|D_k(t)| \le \frac{\pi}{2t}, \quad |F_k(t)| \le \frac{\pi^2}{2(k+1)t^2}, \quad t > 0, k = 0, 1, \ldots.$$

В соответствии с (4.5) будем иметь

$$|U(f, x_0; \Lambda, h) - \theta(x_0)| \le$$

$$\le \varepsilon + \text{const} \lim_{N \to +\infty} \int_{\delta}^{\pi} |\Psi(t, x_0)| \left(|\lambda_N(h)| \frac{1}{\delta} + |\Delta\lambda_N(h)| \frac{1}{\delta^2} + \sum_{k=0}^{N-1} |\Delta^2 \lambda_k(h)| \frac{1}{\delta^2} \right) dt \le$$

$$\le \varepsilon + C_{\delta} \lim_{N \to +\infty} \left(|\lambda_N(h)| + |\Delta\lambda_N(h)| + \sum_{k=0}^{N-1} |\Delta^2 \lambda_k(h)| \right) (\|f\| + |\theta(x_0)|);$$

при этом

$$\|f\| = \int_{-1}^{1} |f(x)| \rho(x) dx = \int_0^{\pi} |f(\cos t)| \, dt < \infty$$

– норма функции f в пространстве Лебега суммируемых функций; постоянные C здесь и в дальнейшем зависят лишь от явно указанных индексов.

Принимая во внимание условие (3.4), получим

$$|U(f, x_0; \Lambda, h) - \theta(x_0)| \le \varepsilon + C_{\delta} \left(\|f\| + |\theta(x_0)| \right) \sum_{k=0}^{\infty} |\Delta^2 \lambda_k(h)|, \qquad (4.6)$$

причем последний ряд сходится в силу условия (3.3). Для произвольного $\gamma > 0$ подберем теперь столь большой номер $N_0 = N_0(\gamma)$, что

$$\frac{\Sigma(\lambda)}{N_0 + 1} < \frac{\gamma}{1 + C_{\delta}(\|f\| + |\theta(x_0)|)}. \qquad (4.7)$$

Тогда

$$\sum_{k=0}^{\infty} |\Delta^2 \lambda_k(h)| = \sum_{k=0}^{N_0} |\Delta^2 \lambda_k(h)| + \frac{1}{N_0 + 1} \sum_{k=N_0+1}^{\infty} (k+1) |\Delta^2 \lambda_k(h)| \le \sum_{k=0}^{N_0} |\Delta^2 \lambda_k(h)| + \frac{\Sigma(\lambda)}{N_0 + 1}$$

и, в силу (4.6), (4.7),

$$|U(f, x_0; \Lambda, h) - \theta(x_0)| \le \varepsilon + C_{\delta} \left(\|f\| + |\theta(x_0)| \right) \sum_{k=0}^{N_0} |\Delta^2 \lambda_k(h)| + \gamma.$$

Здесь, согласно условию (4.1), сумма $\sum_{k=0}^{N_0} |\Delta^2\lambda_k(h)|$ с фиксированным (по h) числом слагаемых стремится к нулю при $h \to +0$. Следовательно,

$$\lim_{h\to+0} |U(f, x_0; \Lambda, h) - \theta(x_0)| \le \varepsilon + \gamma.$$

Ввиду произвольности ε и γ последний предел равен нулю и соотношение (4.2) доказано. Осталось доказать равномерную сходимость (4.3), то есть установить, что

$$\lim_{h\to+0} (\max_{-1\le x\le 1} |U(f, x; \Lambda, h) - f(x)|) = 0. \tag{4.8}$$

Как и в случае (4.4), получим

$$|U(f, x; \Lambda, h) - f(x)| \le$$

$$\le \lim_{N\to+\infty} \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (|f(\cos(y+t)) - f(\cos y)| + |f(\cos(y-t)) - f(\cos y)|) \cdot$$

$$\cdot \left| \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^{N} \lambda_k(h) \cos kt \right| dt. \tag{4.9}$$

В силу непрерывности функции f для любого $\varepsilon > 0$ существует $\delta = \delta(\varepsilon) > 0$, такое, что

$$|f(\cos(y+t)) - f(\cos y)| + |f(\cos(y-t)) - f(\cos y)| < \frac{\varepsilon}{1 + 2\Sigma(\lambda)} \text{ при } |t| < \delta$$

равномерно по $y \in [0, \pi]$. Далее, аналогично (4.5), (4.6), из оценки (4.9) будет следовать, что

$$|U(f, x; \Lambda, h) - f(x)| \le \varepsilon + C_\delta (\max_{-1\le x\le 1} |f(x)|) \sum_{k=0}^{\infty} |\Delta^2\lambda_k(h)|.$$

Для произвольного $\gamma > 0$ подберем теперь столь большой номер $N_0 = N_0(\gamma)$, что

$$\frac{\Sigma(\lambda)}{N_0 + 1} < \frac{\gamma}{1 + C_\delta \max\limits_{-1\le x\le 1} |f(x)|}.$$

Значит

$$|U(f, x; \Lambda, h) - f(x)| \le \varepsilon + C_\delta \left(\max_{-1\le x\le 1} |f(x)| \right) \sum_{k=0}^{N_0} |\Delta^2\lambda_k(h)| + \gamma. \tag{4.10}$$

Поскольку правая часть (4.10) не зависит от x, то оценка сохраняется, если левую часть этого соотношения заменить на $\max\limits_{-1\le x\le 1} |U(f, x; \Lambda, h) - f(x)|$. Как и выше, сумма $\sum_{k=0}^{N_0} |\Delta^2\lambda_k(h)|$ стремится к нулю при $h \to +0$. Значит,

$$\lim_{h\to+0} \left(\max_{-1\le x\le 1} |U(f, x; \Lambda, h) - f(x)| \right) \le \varepsilon + \gamma,$$

откуда, в силу произвольности ε и γ, и следует утверждение (4.8). Теорема полностью доказана.

5. Класс $\mathbf{C}_{[-1,\,1]}$ функций и средние рядов Фурье–Чебышева

Через $\mathbf{C}_{[-1,\,1]}$ обозначим класс функций, непрерывных на отрезке $[-1,1]$. Будем говорить, что ряд

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n p_n(x) \tag{5.1}$$

принадлежит классу $\mathbf{C}_{[-1,\,1]}$, если существует функция $f \in \mathbf{C}_{[-1,\,1]}$, такая, что $\{a_n\}$ есть последовательность ее коэффициентов Фурье–Чебышева

$$a_n = a_n(f) = \int_{-1}^{1} f(x)\, p_n(x)\rho(x)dx, \quad n = 0, 1, \ldots .$$

Следующий результат представляет собою обобщение и распространение на случай полиномиальных разложений теоремы 4.2 книги [8, т. 1, с. 222].

Теорема 5.1. Пусть для последовательности (1.5) выполнены условия (3.3), (3.4) и (4.1). Ряд (5.1) принадлежит классу $\mathbf{C}_{[-1,\,1]}$ тогда и только тогда, когда семейство

$$V(x;\Lambda,h) = \sum_{k=0}^{\infty} \lambda_k(h) a_k\ p_k(x) \tag{5.2}$$

обладает равномерной сходимостью при $h \to +0$.

Доказательство. Если (5.2) есть ряд Фурье–Чебышева функции из класса $\mathbf{C}_{[-1,\,1]}$, то равномерная сходимость $V(x;\Lambda,h)$ установлена в теореме 4.1. Докажем обратное утверждение. Рассмотрим

$$\int_{-1}^{1} V(x;\,\Lambda,h)\, p_k(x)\rho(x)dx\,.$$

Ввиду равномерной сходимости $V(x;\Lambda,h)$ возможно почленное интегрирование ряда (5.2). С учетом ортонормированности (с весом $\rho(x)$) системы полиномов $\{p_k(x)\}$, получаем

$$\lambda_k(h) a_k = \int_{-1}^{1} V(x;\Lambda,h)\, p_k(x)\rho(x)dx\,, \quad k = 0, 1, \ldots .$$

Переходя в этом равенстве к пределу при $h \to +0$ будем, в силу (4.1), иметь

$$a_k = \int_{-1}^{1} \left(\lim_{h\to+0} V(x;\Lambda,h) \right) p_k(x)\rho(x)dx, \quad k = 0, 1, \ldots ,$$

так что (5.2) есть ряд Фурье–Чебышева непрерывной на $[-1,1]$ функции $f(x) = \lim\limits_{h\to+0} V(x;\Lambda,h)$, что и требовалось доказать.

6. Восстановление функции по ее степенным моментам

Степенными моментами функции $f = f(x)$, суммируемой на $[-1, 1]$ с весом, называются числа

$$\mu_l = \mu_l(f) = \int_{-1}^{1} f(x) x^l \rho(x) dx, \quad l = 0, 1, \ldots. \tag{6.1}$$

Одной из составляющих классической проблемы моментов [9, с. 215] является задача о нахождении функции f по заданным μ_l, $l = 0, 1, \ldots$. Пусть, например, известно, что $\{\mu_l\}$ есть бесконечная последовательность степенных моментов некоторой $f \in \mathbf{C}_{[-1,1]}$. Ставится задача восстановить эту функцию.

Теорема 6.1. Предположим, что для последовательности (1.5) выполнены условия (3.3), (3.4), (4.1). Тогда равномерно по $x \in [-1, 1]$ имеет место равенство

$$f(x) = \lim_{h \to +0} \sum_{k=0}^{\infty} \lambda_k(h) \left(2^{k-1} \mu_k(f) + \sum_{l=0}^{k-1} \beta_l \mu_l(f) \right) p_k(x), \tag{6.2}$$

где коэффициенты β_l те же, что в разложении косинуса (1.2).

Соотношение (6.2) есть аналог (и обобщение) формулы Херглотца, построенной в случае тригонометрических моментов (см., напр., [9, с. 594]).

Доказательство теоремы. Согласно (6.1) и (1.2) сумма

$$2^{k-1} \mu_k(f) + \sum_{l=0}^{k-1} \beta_l \mu_l(f)$$

есть интеграл вида

$$\int_{-1}^{1} f(x) p_k(x) \rho(x) dx,$$

то есть k-й ($k = 0, 1, \ldots$) коэффициент Фурье–Чебышева искомой непрерывной функции f. Следовательно, под знаком предела в (6.2) записан оператор (1.6). Теперь утверждение теоремы 6.1 вытекает из результата (4.3) теоремы 4.1.

7. Примеры. Обобщения и распространения

7.1. Как показано в [10], важный класс последовательностей (1.5), удовлетворяющих условиям теорем пп.4 – 6, определяется экспоненциальной функцией

$$\lambda_k(h) = \lambda(x, h)|_{x=k}, \quad k = 0, 1, \ldots,$$

где $\lambda(x, h) = \exp(-h\varphi(x))$; $\varphi(0) = 0$, функция $\varphi(x) \in C^2(0, +\infty)$ и возрастает к $+\infty$. Приведем примеры возможных $\varphi(x)$:

1) $\varphi(x) = \ln^{\alpha}(x+1), \quad x > 0, \alpha > 0$;

2) $\varphi(x) = x^{\alpha}, \quad x > 0, \alpha > 0$;

3) $\varphi(x) = P_n(x), x > 0$; $P_n(0) = 0$;

здесь $P_n(x)$ – любой полином с положительным старшим коэффициентом ($n = 1, 2, \ldots$).

Важнейшим примером является метод Пуассона–Абеля [8, т. 1, с. 160 – 165], соответствующий случаю $\lambda(x,h)=\exp(-hx)$.

7.2. Утверждение теоремы 4.1, относящееся к суммированию в точках непрерывности, может быть перенесено (с использованием аналогичной техники) на значительно более общий случай точек Лебега. Таким образом, результаты статьи [11] распространяются на средние рядов Фурье–Чебышева.

7.3. Представление средних $U(f,x;\Lambda,h)$ в тригонометрической форме (1.7) дает возможность обобщить условие (3.3), заменив $\Sigma(\lambda)$ на сумму типа Б. Надя [12]

$$\max_{k=0,1,\dots}|\lambda_k(h)|+\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(k+1)(|m-k|+1)}{m+k+1}\ln\frac{2(m+k+1)}{|m-k|+1}|\Delta^2\lambda_k(h)|, \qquad (7.1)$$

где $m\ge 0$ – произвольное целое число (m может зависеть от h). В свою очередь, использование (7.1) позволяет расширить класс методов суммирования; так, в «финитном» случае (3.2) результат теоремы 4.1 будет справедлив для методов Чезаро–Абеля

$$\Lambda=\{\lambda_k^m=\frac{A_{m-k}^{\alpha}}{A_m^{\alpha}};\ k=0,1,\dots,m;\ m=0,1,\dots;\ \lambda_k^m=0,\ k>m\},$$

где $A_m^{\alpha}=\dfrac{(\alpha+1)\cdot\dots\cdot(\alpha+m)}{m!}$, $\alpha>0$.

7.4. Благодаря представлению (1.7) для средних (1.6) могут быть доказаны максимальные весовые оценки, подобные приведенным в работе [3], а также получены другие аналоги результатов [3].

Список литературы

1. Нахман, А. Д. Разложение функций в степенные и тригонометрические ряды : учебное пособие / А. Д. Нахман, Б. П. Осиленкер. – Saarbrucken : Palmarium Academic Publishing, 2017. – 124 с.

2. Суетин, П. К. Классические ортогональные многочлены / П. К. Суетин. – 2-е изд., доп. – М. : Наука, 1979. – 416 с.

3. Осиленкер, Б. П. Задачи, ассоциированные с представлением Дирихле полугруппы операторов / Б. П. Осиленкер, А. Д. Нахман // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 3. – С. 492 – 511. doi: 10.17277/vestnik.2018.03.pp.492-511

4. Осиленкер, Б. П. О рядах Фурье по обобщенным собственным функциям дискретного оператора Штурма-Лиувилля / Б. П. Осиленкер // Функциональный анализ и его приложения. – 2018. – Т. 52, № 2. – С. 90 – 93. doi: 10.4213/faa3486

5. Осиленкер, Б. П. О линейных методах суммирования разложений Фурье по ортонормированным многочленам / Б. П. Осиленкер // Доклады Академии наук СССР. – 1973. – Т. 209, № 1. – С. 40 – 42.

6. Тиман, А. Ф. Теория приближений функций действительного переменного / А. Ф. Тиман. – М. :Физматгиз, 1960. – 624 с.

7. Алексич, Г. Проблемы сходимости ортогональных рядов / Г. Алексич ; под ред. П. Л. Ульянова ; пер. с англ. А. В. Ефимова. – М. : Издательство иностранной литературы, 1963. – 359 с.

8. Зигмунд, А. Тригонометрические ряды : пер. с англ. : в 2 т. / А. Зигмунд. – М. : Мир, 1965. – 2 т.

9. Аткинсон, Ф. В. Дискретные и непрерывные граничные задачи / Ф. В. Аткинсон ; пер. с англ. И. С. Иохвидова, Г. А. Каральник ; под ред. И. С. Каца, М. Г. Крейна. – М. : Мир, 1968. – 750 с.

10. Нахман, А. Д. Экспоненциальные методы суммирования рядов Фурье / А. Д. Нахман, Б. П. Осиленкер // Вестник Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 1. – С. 101 – 109.

11. Осиленкер, Б. П. Поведение экспоненциальных средних рядов Фурье и сопряженных рядов Фурье в точках Лебега / Б. П. Осиленкер, А. Д. Нахман // Вестник МГСУ. – 2014. – № 10. – С. 54 – 63.

12. Nagy, B. Sz. Methodes de Sommation des Series de Fourier / B. Sz. Nagy// Acta Sci. Math. Szeged, XII, pars. B. – 1950. – P. 204 – 210.

Function Polynomization Methods and their Applications

A. D. Nakhman

Department of Higher Mathematics, alextmb@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: quasiconvex sequences; Fourier – Chebyshev series; summability by semicontinuous methods.

Abstract: A class of semicontinuous quasiconvex methods of summation of Fourier – Chebyshev series is studied. Upper bounds are obtained for the norms of the corresponding operators in the space of continuous functions. The convergence of means in the metric of space is established. The summability at break points of the first kind is also considered. Processes for restoring functions from a given sequence of power moments are proposed. Ways of generalizing the results and extending them to the case of summability at Lebesgue points are indicated.

References

1. Nakhman A.D., Osilenker B.P. *Razlozheniye funktsiy v stepennyye i trigonometricheskiye ryady: uchebnoye posobiye* [Decomposition of functions in power and trigonometric series: a tutorial], Saarbrucken : Palmarium Academic Publishing, 2017, 124 p. (In Russ.)

2. Suyetin P.K. *Klassicheskiye ortogonal'nyye mnogochleny* [Classical orthogonal polynomials], Moscow: Nauka, 1979, 416 p. (In Russ.)

3. Osilenker B.P., Nakhman A.D. [Problems associated with the Dirichlet representation of a semigroup of operators], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 3, pp. 492-511, doi: 10.17277/ vestnik.2018.03.pp.492-511 (In Russ., abstract in Eng.)

4. Osilenker B.P. [On Fourier series in generalized eigenfunctions of the discrete Sturm-Liouville operator], *Funktsional'nyy analiz i yego prilozheniya* [Functional analysis and its applications], 2018, vol. 52, no. 2, pp. 90-93, doi: 10.4213/faa3486 (In Russ., abstract in Eng.)

5. Osilenker B.P. [On linear methods of summation of Fourier expansions in orthonormal polynomials], *Doklady Akademii nauk SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1973, vol. 209, no. 1, pp. 40-42. (In Russ.)

6. Timan A.F. *Teoriya priblizheniy funktsiy deystvitel'nogo peremennogo* [Theory of approximations of functions of a real variable], Moscow: Fizmatgiz, 1960, 624 p. (In Russ.)

7. Aleksich G., Ul'yanov P. L. [Ed.] *Problemy skhodimosti ortogonal'nykh ryadov* [Problems of convergence of orthogonal series], Moscow: Izdatel'stvo inostrannoy literatury, 1963, 359 p. (In Russ.)

8. Zygmund A. *Trigonometric series*, Cambridge University Press, 1959.

9. Atkinson F.V., Kats I.S., Kreyn M.G. [Eds.] *Diskretnyye i nepreryvnyye granichnyye zadachi* [Discrete and continuous boundary problems], Moscow: Mir, 1968, 750 p. (In Russ.)

10. Nakhman A.D., Osilenker B.P. [Exponential methods of summation of Fourier series], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 1, pp. 101-109. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Osilenker B.P., Nakhman A.D. [Behavior of exponential means of Fourier series and conjugate Fourier series at Lebesgue points], *Vestnik MGSU* [Bulletin of MGSU], 2014, no. 10, pp. 54-63. (In Russ., abstract in Eng.)

12. Nagy B.Sz. Methodes de Sommation des Series de Fourier, *Acta Sci. Math. Szeged,* XII., pars. B, 1950, pp. 204-210.

Polynomisierungsmethoden der Funktionen und ihre Anwendungen

Zusammenfassung: Eine Klasse halbstetiger quasikonvexer Summationsmethoden der Fourier–Chebyshev-Reihe wird untersucht. Es sind Obergrenzen für die Normen der entsprechenden Operatoren im Raum stetiger Funktionen erhalten. Es ist die Konvergenz der Mittel in der Raummetrik festgestellt. Es ist auch die Summierbarkeit in den Bruchpunkten der ersten Art betrachtet. Es sind Verfahren zum Wiederherstellen der Funktionen nach der gegebenen Reihenfolge der Potenzmomente vorgeschlagen. Es sind die Möglichkeiten angegeben, die Ergebnisse zu verallgemeinern und auf den Fall der Summierbarkeit in Lebesgue-Punkten auszudehnen.

Méthodes de polynomisation des fonctions et de leur application

Résumé: Est étudiée une classe des méthodes semi–continues de sommation de séries de Fourier–Tchebyshev. Sont obtenues les supérieures estimations des normes des opérateurs correspondant dans l'espace des fonctions continues. Est établie la convergence des moyennes dans la métrique de l'espace. Est également examinée la sommabilité aux points de rupture du premier ordre. Sont proposés des processus de la restauration des fonctions selon une séquence donnée des moments de puissance. Sont indiqués les moyens de la généralisation des résultats et leur application dans le cas de la sommabilité aux points de Lebesgue.

Автор: ***Нахман Александр Давидович*** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: ***Куликов Геннадий Михайлович*** **–** доктор физико-математических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской лабораторией, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

УДК 66 – 986; 66.2
DOI: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.450-458

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ДОПУСТИМОЙ УТЕЧКИ ИЗ РАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ РОССИЙСКИХ И ЗАРУБЕЖНЫХ СТАНДАРТОВ

Г. В. Божко[1], В. Д. Продан, М. С. Фокина[2], Н. И. Воробьева[1]

Кафедра «Процессы и аппараты химической технологии»(1), hitema@npp-htm.ru,
Центр проектной деятельности (2),
ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Россия

Ключевые слова: герметичность; крепежные элементы; прокладка; прокладочный коэффициент; разъемные соединения; терморасширенный графит; уплотняющие поверхности; фланцы.

Аннотация: В производствах нефтехимической, атомной, газовой промышленности используются высокие технологические параметры, и в первую очередь к ним относятся температура и давление. Технологические процессы, как правило, осуществляются в емкостном оборудовании, надежность которого определяется герметичностью его разъемных соединений. В период интеграции разработок, изготовления и использования оборудования химического, нефтехимического и других производств существует необходимость общих нормативных документов по их расчетам и изготовлению. По разным направлениям уже существует много общих европейских стандартов, применяемых в отдельных странах. В последнее время остро встал вопрос по созданию единых стандартов и в области герметичности разъемных соединений. Дан анализ литературных источников и в первую очередь существующих стандартов ведущих промышленных стран по расчету разъемных соединений на прочность и герметичность.

В настоящее время, в производствах нефтехимической, атомной, газовой промышленности используются высокие технологические параметры, и в первую очередь к ним относятся температура и давление. Постепенное уменьшение запасов нефти привело к развитию новых технологий для более полного извлечения продуктов из нефти. Эти технологии основаны на использовании средних, высоких и даже сверхвысоких давлений. Например, каталитический риформинг – современный, широко применяемый процесс для производства высокооктановых бензинов из низкооктановых, осуществляется в среде водородсодержащего газа при температуре 470…530° С и давлении 1…4 МПа. Другой процесс – гидрокрекинг – предназначен для получения малосернистых топливных дистиллятов из различного сырья, он более позднего поколения, чем каталитический крекинг и каталитический риформинг, поэтому более эффективно осуществляет те же задачи, что и эти два процесса. Газосырьевая смесь, пройдя теплообменник и змеевики печи, нагревается до температуры реакции 290…400 °С и под давлением 8…14 МПа вводится в реактор.

Нефтяные продукты, такие как минеральные удобрения, кислоты, получают при средних давлениях, а синтез аммиака идет при давлениях 36 МПа. В химических производствах начинают находить применение все более и более высокие давления.

Технологические процессы, как правило, осуществляются в емкостном оборудовании, которое рассчитывается, подбирается и работает необходимое время в определенном цикле заданных технологических параметров, которые не должны выйти из установленного режима. Любое емкостное оборудование имеет минимум три разъемных соединения, это крышка аппарата и хотя бы два штуцера для ввода исходного и вывода готового продуктов, не говоря о датчиках давления и температуры. Надежность работы оборудования, находящегося под давлением или вакуумом, во многом определяется герметичностью его разъемных соединений, то есть каждая единица оборудования должна иметь надежные разъемные герметичные соединения (**РГС**). При разгерметизации соединения нарушается технологический процесс, ухудшается качество продукта, нарушается экология, все это может привести к человеческим жертвам. Поэтому вопрос герметичности оборудования при эксплуатации установок весьма актуален.

В настоящее время, в период интеграции разработок, изготовления и эксплуатации оборудования химического, нефтехимического и других производств из разных стран, существует необходимость общих нормативных документов по их расчетам и изготовлению. По разным направлениям уже существует ряд общих европейских стандартов, применяемых в отдельных странах. В последнее время остро встал вопрос по созданию единых стандартов и в области герметичности разъемных соединений (**РС**).

Цель работы – анализ литературных источников и в первую очередь существующих стандартов ведущих промышленных стран по расчету разъемных соединений на прочность и герметичность, сравнение существующих подходов по выбору допустимого уровня утечки разъемных соединений с прокладками из ТРГ в России и за рубежом, а также определение максимально допустимой удельной скорости утечки для дальнейших исследований.

Аналитическая часть

При разработке РГС должны быть одновременно обеспечены и герметичность соединения, и прочность его элементов при сборке и эксплуатации. В качестве критерия прочности принимают максимально допускаемое, исходя из нагрузки и принятого материала детали, напряжение. Его определение особой сложности не представляет, так как все необходимые параметры конструкционных материалов представлены в доступных источниках информации.

За критерий герметичности принимают минимальную удельную нагрузку на уплотняющий элемент, при которой соединение считается герметичным. Критерий герметичности зависит от многих факторов: материала уплотнителя, точности изготовления и чистоты обработки его уплотняющих поверхностей, давления и свойств уплотняемой среды, ее температуры и др. Такая многофакторная зависимость критерия герметичности существенно затрудняет его оценку аналитическими методами, поэтому данный критерий определяют экспериментально или на моделях РС, или на реальных конструкциях. Экспериментальные исследования сводятся к определению зависимости между заданным давлением p уплотняемой среды в каком-либо аппарате и нагрузкой на сопрягаемые уплотняющие поверхности $[q]$, при которых для конкретного соединения обеспечивается установленная степень герметичности, то есть допускаемая по условию эксплуатации протечка уплотняемой среды, $[q] = f(p)$. Для оценки герметичности и в России, и за рубежом существует ряд известных способов ее определения. Для расчета удель-

ной нагрузки на контактирующих поверхностях (критерия герметичности) [q] необходимо знание коэффициентов данного уравнения, значения которых ни в одной стране не регламентированы.

Для расчета разъемных соединений в российской практике принят ГОСТ 34233.4–2017 [1], который устанавливает нормы и методы расчета на прочность и герметичность фланцевых соединений сосудов и аппаратов, и трубопроводов. Расчеты на прочность приведены для элементов, выполненных из углеродистых и легированных сталей, цветных металлов, применяемых в химической, нефтехимической и других отраслях промышленности, работающих под внутренним давлением или вакуумом, под действием осевых сил и изгибающих моментов в условиях однократных и многократных нагружений.

Наиболее близкими к ГОСТу 34233.4–2017 следующие:

– Европейский стандарт EN 1591-1:2013 [2], изданный в Великобритании, который существует в трех официальных версиях (английской, французской, немецкой). «Фланцы и их соединения – Правила расчета круглых фланцевых соединений с прокладками – Часть 1: Метод расчета»;

– Европейский стандарт BS EN 13555:2004 [3], официальная версия на английском языке. «Фланцы и их соединения – Характеристики прокладок и процедуры испытаний относительно правила проектирования круглых фланцевых соединений с прокладками»;

– немецкий стандарт DIN 3535-6 2018.04 [4] Уплотнения для газового снабжения. Часть 6: Материалы для плоских уплотнений на основе синтетических волокон, графита или политетрафторэтилена (**PTFE**) для газовой арматуры, газовой аппаратуры и газовых трубопроводов;

– американский стандарт на проектирование сосудов ASME BPVC.VIII.1-2015 [5]. Правила строительства сосудов высокого давления;

– американский стандарт ASTM F 3149-15 [6]. Стандартная практика для определения коэффициента обслуживания (м) и коэффициента доходности (у), применимые к прокладочным материалам и конструкции.

Данные стандарты основаны на том положении, что, как правило, герметичные соединения не являются абсолютно герметичными и только определенная (заданная степень) герметичность может быть достигнута [7].

Методика проведения расчетов во всех вышеперечисленных стандартах примерно одинаковая и начинается с выбора фланцев, конструкции соединения. С помощью различных коэффициентов, учитывающих работу РС, материал, конструкцию, экономику и т.д., создается математическая модель конкретного РС. Далее, как и в стандарте РФ, проводится силовой анализ нагрузок на детали соединения при его сборке и в рабочих условиях.

Для обеспечения правильной работы болтового фланцевого соединения необходимо определение реальных граничных условий – требований к герметичности и прочности.

Силовые нагрузки в разъемном соединении при монтаже и в рабочем состоянии в первую очередь зависят от заданного давления в аппарате. Связь между давлением среды в аппарате и силовыми параметрами в разъемном соединении учитывается прокладочным коэффициентом, который устанавливается только экспериментально и для заданной утечки среды, принятой за условную герметичность. Для расчета усилий в РС во всех стандартах приведены численные значения прокладочных коэффициентов для основных прокладочных материалов, используемых при уплотнении разъемных узлов, при которых соединение считается герметичным. Данные коэффициенты являются основой всех расчетов на герметичность и, в какой-то мере, на прочность, так как все определяемые нагрузки на детали соединения должны обеспечить заданную степень герметичности соединения в рабочих условиях и при сборке РС.

В настоящее время в Европе существует несколько стандартов и методик по определению требований к герметичности и по испытаниям [7]. Немецкое техническое руководство по чистому воздуху – TA Luft является первым документом в этом контексте в Европе [8]. Цель TA Luft – определение основы для оценки загрязнения воздуха в случаях, когда обрабатываются токсичные среды или опасные летучие загрязнители воздуха (в основном органические среды). Для этого TA Luft определяет: значения концентрации и осаждения вещества; объем и объемный расход отходящего газа (газы – носители с твердыми, жидкими и газообразными выбросами) и выбросы (загрязнение, выделяемое установкой).

Согласно TA Luft: «Фланцевые соединения должны использоваться только в тех случаях, когда они необходимы по причинам обработки, безопасности или технического обслуживания. В этих случаях должны использоваться технически герметичные фланцевые соединения». В соответствии со справочником 2440 VDI «Сокращение выбросов – нефтеперерабатывающие заводы» требуется использование уплотнительных элементов «высокой производительности» в болтовых фланцевых соединениях [9]. «Высокая производительность» в соответствии с TA Luft означает: «…, что конструкция уплотнительной системы позволит нормально функционировать в долгосрочной перспективе в данных условиях эксплуатации». В других случаях аппаратура должна быть сварная. Однако руководящие принципы Ta Luft и VDI 2440 являются репрезентативными только для конкретных граничных условий тестирования. Как правило, полученные результаты не переносятся на другие условия, поэтому использование рекомендаций Ta Luft в настоящее время не очень удобно.

В зарубежных стандартах введены три класса герметичности, в которых определенная величина утечки принята за условную герметичность. В немецких и английских стандартах они расположены по убывающему, а в американских – по возрастающему порядку. В немецких стандартах у классов герметичности $L_{0,01}$, $L_{0,1}$, $L_{1,0}$, скорости утечки составляют соответственно 0,01; 0,1 и 1,0 мг·(с·м)$^{-1}$, где длина окружности прокладки определяется по среднему диаметру, м. Это определение класса герметичности было принято и Европейской стандартизацией (EN 13555 [3]).

Аналогичным образом в США определены классы герметичности (*T*1, *T*2, ...), но с другой более низкой количественной утечкой. Независимо от диаметра прокладки каждому классу соответствует определенная утечка. На рисунке 1 для сравнения показаны уровни утечек для разных стандартов по классам герметичности [7]: классы герметичности по американскому стандарту пересчитаны и соотносятся с окружностью для целей сравнения, также даны значения утечки согласно немецкому техническому руководству по чистому воздуху – TA Luft [8].

В российских и зарубежных стандартах для определения прокладочных коэффициентов проводят примерно одинаковые испытания, в результате которых получают зависимости утечки от удельной нагрузки на сопрягаемые поверхности и от давления среды.

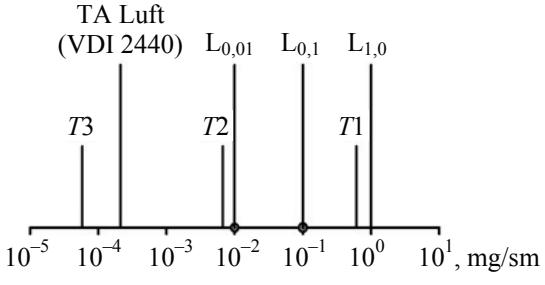


Рис. 1. Классы герметичности в европейских и американских стандартах

Например, по Европейскому стандарту EN 13555:2004 [3] определяют усилия на поверхность прокладки при нагрузке $Q_{min(L)}$ и разгрузке $Q_{smin(L)}$, МПа, при которых нагрузка на прокладку не должна превышать Q_{smax}, при которой происходит ее смятие – превышение предела текучести.

Процедура испытания состоит из нагрузки и разгрузки прокладки циклическим образом через каждые 10 МПа с измерением скорости утечки при эффективных нагрузках на поверхности, с изменением давления инертного газа с 4 МПа либо до завершения цикла «нагрузки – разгрузки» при 160 МПа, либо до превышения значения Q_{smax} в следующей точке загрузки.

На рисунке 2, в качестве примера, представлены данные, полученные при испытании прокладки под разным внутренним давлением. Прокладка работает по циклу «нагрузка – разгрузка», при сборке РС она нагружается, в рабочих условиях, когда РС находится под давлением среды, она частично разгружается. Измеренная скорость утечки нанесена на график в зависимости от эффективного напряжения (критерия герметичности). Скорости утечки для циклов нагрузки уменьшаются с увеличением контактного напряжения на уплотняемых поверхностях. Значения $Q_{min(L)}$ для испытанной прокладки определяются как пересечение линий *1*, *2*, *3* с соответствующими линиями *4*, *5*, *6*, *7*.

При снятии или уменьшении нагрузки в какой-либо точке прямых *1*, *2*, *3* скорости утечки проявляют обратную тенденцию в сравнении с циклами нагрузки. Это является следствием уровня напряжения, существовавшего перед разгрузкой, что моделирует фактические условия обслуживания и, следовательно, линии разгрузки обеспечивают значения $Q_{smin(L)}$ (на графике не показаны) при окружающей температуре.

По нашему мнению, снятие или уменьшение нагрузки в какой-либо точке прямых *1*, *2, 3* влияет на разность между коэффициентами трения покоя и движения. Изменение характера зависимости удельной нагрузки на прокладку при колебаниях нагрузки (нагрузка – разгрузка) зависит от величины реверса сил трения в зоне контакта прокладки и фланцев и разности значений коэффициентов трения покоя и движения.

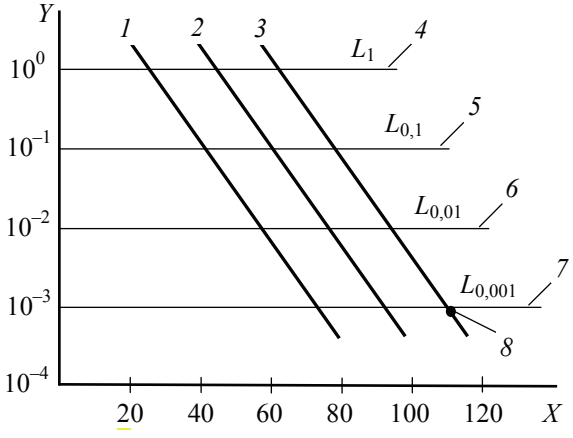


Рис. 2. Зависимость скорости утечки от нагрузки, действующей на прокладку (при различном внутреннем давлении):

X – эффективное напряжение, действующее на прокладку, МПа; *Y* – скорость утечки, мг (м сек)$^{-1}$; *1 – 3* – зависимости скорости утечки от эффективного напряжения, действующего на прокладку, соответственно для давления p_1, p_2, p_3; *4 – 7* – линии допускаемых уровней утечки, определенные герметичности; *8* – $Q_{min(L)}$

Из стандарта EN 13555:2004 [3] следует, что дополнительные данные должны быть получены с другими значениями внутреннего давления газа, МПа, например, p_2 и p_3. Далее берутся допускаемые уровни утечки, определенные тремя классами [3], и строятся кривые зависимости эффективного давления (критерия герметичности) на поверхности прокладки $Q_{\text{smin(L)}}$ от давления среды. По этим кривым получают прокладочный коэффициент m, используемый далее в расчетах на прочность деталей соединения.

В отличие от EN 13555:2004, в немецком стандарте DIN 3535-6 2018.04 [4] испытание подразумевает определение герметичности материала уплотнения. Поэтому между прокладкой и поверхностями фланцев прокладывается полиэтиленовая пленка для снижения течи по поверхности уплотнения, что на наш взгляд не является правомерным действием.

Результаты и обсуждения

Применение для расчета соединений американских, а также европейских стандартов требует определения большого числа коэффициентов, для получения которых приводятся различные источники информации. Все это усложняет процесс расчета. По существу, некоторые рекомендуемые коэффициенты практически не дают никакой полезной информации и, по-видимому, вошли в нормативную документацию по настоянию отдельных компаний, желающих быть в числе авторов расчетных документов.

Применяемая в РФ методика расчета и конструирования РС значительно проще европейских и американской и более доступна пониманию. В российской методике расчета используется только один необходимый параметр – коэффициент жесткости соединения α, который выражает всю рассчитываемую конструкцию соединения, а именно герметичность самого соединения при выбранном критерии герметичности и прочность его элементов. С помощью данного коэффициента можно влиять на нагрузку и конструкцию деталей соединения, изменяя его в диапазоне 0…1. В зарубежных стандартах все решается коэффициентами, без изменения конструкции.

Для учета влияния температурного воздействия в российской методике расчета используется выражение, полученное с помощью анализа разности температурных деформаций элементов соединения.

Учет релаксации напряжения в соединении в зарубежных стандартах проводится также с помощью коэффициента, определяемого при проведении эксперимента. В Российской методике расчета релаксация напряжений в РС учитывается с помощью скорости падения нагрузки во взаимосвязи со временем их эксплуатации. В результате релаксация учитывается через полученные зависимости коэффициента и показателя ползучести. Данные параметры также относятся к физико-механическим характеристикам материала прокладки и определяются для каждого материала с помощью экспериментов во времени и изменении температуры на основе теории пластичности. Кроме того, используя такой подход, можно либо определять время эксплуатации соединения под заданной нагрузкой, либо, задавшись временем, определять саму нагрузку на уплотнение.

В европейском и американском стандартах используются по три степени герметичности, но с разными значениями утечек. Какие группы реактивов подпадают под каждый указанный класс в стандартах не сказано. При испытании на герметичность используется только стандартное соединение DN40. Чем обусловлены нормы утечек для каждого класса и определенное соединение для испытаний в стандартах также не указано.

В Российской Федерации не принято классов герметичности, но есть ГОСТ на нормы предельно допустимых концентраций и ГОСТ по расчету приточно-вытяжной вентиляции с учетом утечек установки. Действительно, каждая установка содержит большое число разъемных соединений и арматуры, и применение классов герметичности ничего не дает. При разработке оборудования надо закла-

дывать определенную минимальную утечку всех соединений, которая связана со многими факторами, в частности, и с экономическими, и производственными характеристиками, поэтому ее величина должна быть рекомендована технологами.

В зарубежных стандартах нигде не указывается учет проницаемости среды через материал прокладки, что очень важно при применении пористых материалов. Кроме того, при расчете на герметичность ширина контакта уплотняющих поверхностей определяется по заданному интервалу значений, хотя при фильтрационном характере утечки данная величина является важной. Эффективная ширина прокладки и место ее расположения существенно влияют на материалоемкость соединения и, следовательно, его экономичность. В расчетной практике РФ данный вопрос решен с точки зрения работы прокладки при сборке и в рабочих условиях.

В мировой практике не существует всеобъемлющей документации на единую допускаемую величину протечки уплотняемой среды. Практически каждая компания, выпускающая уплотнения, имеет свои данные по этой проблеме. В зарубежных стандартах рассматриваются только соединения принудительного типа (по нашей терминологии), но ничего не говорится о самоуплотняющихся разъемных соединениях. В Российской Федерации выпущены специальные ГОСТы по расчету и конструированию сосудов высокого давления с самоуплотняющимися затворами.

Заключение

На сегодняшний день подход к вопросам исследования герметичности и расчету разъемных соединений в европейском, американском и российском стандартах достаточно близкий. Однако существует немало принципиальных отличий.

Основное отличие – классы герметичности, которые, на наш взгляд, не очень понятны и мало что дают. Предлагаем создать банки данных по зависимостям утечки газовой (воздух, азот) и жидкой (вода) сред от удельной нагрузки на уплотняющих поверхностях и давления среды для используемых прокладок из разного материала.

В данном случае можно принять любую утечку, в зависимости от условий эксплуатации, экологической опасности среды, и определить критерий герметичности при заданной условной герметичности. Далее вести расчет согласно российской методике расчета.

Однако, это достаточно длительный процесс, рассчитанный на перспективу, и возможен в случае интеграции научно-исследовательских разработок. Поэтому в настоящий момент для проведения сравнения данных по герметичности с российскими требованиями и успешного внедрения импортного оборудования в России предлагаем взять за основу те же скорости утечки среды из РС, которые приняты в Европейском стандарте EN 13555:2004: 0,01; 0,1 и 1,0 мг·(с·м)$^{-1}$ соответственно для классов герметичности $L_{0,01}$, $L_{0,1}$, $L_{1,0}$. Кроме того, считаем необходимым учет вышеупомянутых параметров, которых не хватает в зарубежных стандартах.

Список литературы

1. ГОСТ 34233.4–2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений. – М. : Стандартинформ, 2018. – 41 с.

2. EN 1591-1:2013. European Standard. English Version. Flanges and Their Connections-Rules for Calculating Circular Flange Connections with Gaskets-Part 1: Calculation Method.

3. BS EN 13555:2004. British Standard. Flanges and Their Joints – Gasket Parameters and Test Procedures Relevant to the Design Rules for Gasketed Circular Flange Connections.

4. DIN 3535-6: 2018-04. Germany. Seals for Gas Supply. Part 6: Materials for Flat Seals Based on Synthetic Fibers, Graphite or Polytetrafluoroethylene (PTFE) for Gas Fittings, Gas Equipment and Gas Pipelines.

5. ASME BPVC.VIII.1-2015, USA. SECTION VIII. Rules for Construction of Pressure Vessels.

6. F3149 – 15, USA. Standard Practice for Determining the Maintenance Factor (m) and Yield Factor (y) Loading Constants Applicable to Gasket Materials and Designs1.

7. Proceedings of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Engineering (Smart 17), August 17 – 22, 2003, Prague, Czech Republic.

8. Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesumweltschutzgesetz (TA Luft); 24 Juli, 2002, in Kraft Getreten am 1 Oktober 2002.

9. VDI Guideline 2440 “Emissionsreduzierung - Raffinerien”; November 2000; VDI / DIN-Handbuch “Saubere Luft”, Vol. Drei.

The Analysis of the Conditions of Permissible Leakage from Detachable Joints of Process Equipment Based on Russian and Foreign Standards

G. V. Bozhko[1], V. D. Prodan, M. S. Fokina[2], N. I. Vorobyeva[1]

Department of Processes and Devices of Chemical Technology (1), hitema@npp-htm.ru; Center for Project Activities (2), Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Keywords: tightness; fasteners; gasket; laying factor; detachable connections; thermally expanded graphite; sealing surfaces; flanges.

Abstract: In the petrochemical, nuclear and gas industries, high technological parameters are used, and first of all, they include temperature and pressure. Technological processes, as a rule, are carried out in capacitive equipment, the reliability of which is determined by the tightness of its detachable joints. In the period of integration of the development, manufacture and use of equipment for chemical, petrochemical and other industries, there is a need for common regulatory documents for their calculations and manufacture. In different areas, there are already many common European standards applied in individual countries. Recently, the issue of creating uniform standards in the field of tightness of detachable joints has arisen. The analysis of literary sources and, first of all, the existing standards of leading industrial countries for the calculation of detachable joints for strength and tightness is given.

References

1. *GOST 34233.4–2017 Sosudy i apparaty. Normy i metody rascheta na prochnost'. Raschet na prochnost' i germetichnost' flantsevykh soyedineniy* [Vessels and apparatus. Norms and methods of strength calculation. Calculation of strength and tightness of flange connections], Moscow: Standartinform, 2018, 41 p. (In Russ.)

2. EN 1591-1:2013. European Standard. English Version. Flanges and Their Connections-Rules for Calculating Circular Flange Connections with Gaskets-Part 1: Calculation Method.

3. BS EN 13555:2004. British Standard. Flanges and Their Joints – Gasket Parameters and Test Procedures Relevant to the Design Rules for Gasketed Circular Flange Connections.

4. DIN 3535-6: 2018-04. Germany. Seals for Gas Supply. Part 6: Materials for Flat Seals Based on Synthetic Fibers, Graphite or Polytetrafluoroethylene (PTFE) for Gas Fittings, Gas Equipment and Gas Pipelines.

5. ASME BPVC.VIII.1-2015, USA. SECTION VIII. Rules for Construction of Pressure Vessels.

6. F3149 – 15, USA. Standard Practice for Determining the Maintenance Factor (m) and Yield Factor (y) Loading Constants Applicable to Gasket Materials and Designs1.

7. Proceedings of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Engineering (Smart 17), August 17 - 22, 2003, Prague, Czech Republic.

8. Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesumweltschutzgesetz (TA Luft); 24 Juli, 2002, in Kraft Getreten am 1 Oktober 2002.

9. VDI Guideline 2440 “Emissionsreduzierung - Raffinerien”; November 2000; VDI / DIN-Handbuch “Saubere Luft”, Vol. Drei.

Analyse der Bedingungen der zulässigen Leckage aus trennbaren Verbindungen der technologischen Ausrüstung aufgrund der russischen und ausländischen Standards

Zusammenfassung: In der Petrochemie-, Nuklear- und Gasindustrie werden hohe technologische Parameter verwendet, zu denen vor allem Temperatur und Druck gehören. Technologische Prozesse werden in der Regel in kapazitiven Geräten durchgeführt, deren Zuverlässigkeit durch die Dichtheit der trennbaren Verbindungselemente bestimmt wird. In der Zeit der Integration der Entwicklung, Herstellung und Verwendung von Geräten für die chemische, petrochemische und andere Industrie sind gemeinsame Regulierungsdokumente für deren Berechnungen und Herstellung erforderlich. In verschiedenen Bereichen gibt es bereits viele gemeinsame europäische Standards, die in einzelnen Ländern angewendet werden. In letzter Zeit ist das Problem der Schaffung einheitlicher Standards im Bereich der Dichtheit von trennbaren Verbindungselementen akut geworden. Es ist die Analyse der literarischen Quellen gegeben und vor allem der bestehenden Standards der führenden Industrieländer nach der Berechnung der trennbaren Verbindungen auf Festigkeit und Dichtheit.

Analyse des conditions de fuite admissibles à partir des raccords des équipements technologiques à la base des normes russes et étrangères

Résumé: Dans les industries pétrochimiques, nucléaires et gazières on utilise des paramètres technologiques élevés, notamment la température et la pression. Les procédés technologiques sont généralement réalisés dans des équipements capacitifs, dont la fiabilité est déterminée par l'étanchéité de ses connexions séparables. Pendant la période de l'intégration du développement, de la fabrication et de l'utilisation de l'équipements de la production chimique, pétrochimique et autres, il est nécessaire de disposer de documents normatifs communs sur leur calcul et leur fabrication. Il existe déjà de nombreuses normes européennes communes dans différents pays. Le dernier temps, la question de la mise en place de normes uniformes et de l'étanchéité des connecteurs s'est posée. Est donnée une analyse des sources littéraires et, en particulier, des normes existant dans les principaux pays industriels pour le calcul de la résistance et de l'étanchéité des raccords.

Авторы: ***Божко Григорий Вячеславович*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Процессы и аппараты химической технологии»; ***Продан Василий Дмитриевич*** – доктор технических наук, профессор; ***Фокина Мария Сергеевна*** – кандидат технических наук, доцент Центра проектной деятельности; ***Воробьева Наталья Ивановна*** – старший преподаватель кафедры «Процессы и аппараты химической технологии», ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Россия.

Рецензент: ***Першин Владимир Федорович*** **–** доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

УДК 629.331
DOI: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.459-471

МЕТОДЫ ПОДДЕРЖАНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОГО СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

В. В. Нечаев

Отдел организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров, nechver@mail.ru; ФГКВОУ ВО «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева», г. Санкт-Петербург, Россия

Ключевые слова: методика поиска отказа; методы поддержания и обеспечения работоспособного состояния; определение отказавшего элемента; оптимальный вариант системы технического обслуживания; распознавание вида отказа; эксплуатация автомобильной техники.

Аннотация: Представлены методы формирования рациональной системы технической эксплуатации автомобильной техники, поддержания и обеспечения ее работоспособного состояния.

Введение

Термин «эксплуатация» для любых объектов в узком смысле означает получение полезного эффекта, который достигается при применении (использовании) объекта по назначению. Однако для сложных технических изделий, к которым, несомненно, относится автомобильная техника (**АТ**), нужно рассматривать значение данного термина в более широком смысле – с учетом всех обеспечивающих мероприятий, прежде всего, мероприятий по поддержанию техники в заданном состоянии для обеспечения успешного ее использования по назначению. В зависимости от уровня рассмотрения эксплуатации технических изделий в литературе доминируют два типа определений – «этапное» и «процессное». В определениях первого типа эксплуатация АТ рассматривается как стадия жизненного цикла, включающая совокупность конкретных этапов, на которых реализуется, поддерживается и восстанавливается ее качество. В определениях второго типа эксплуатация трактуется как совокупность процессов – взаимосвязанных и упорядоченных по времени операций и действий обслуживающего персонала по выполнению задач эксплуатации АТ.

Систему же технической эксплуатации автомобильной техники можно представить как область практической деятельности и как науку, которая определяет пути и методы наиболее эффективного управления техническим состоянием автомобиля в целях обеспечения его регулярного, безопасного и экономически выгодного использования. Одним из направлений совершенствования системы технической эксплуатации АТ является разработка и внедрение методов наиболее эффективного ее использования, поддержания и обеспечения работоспособного состояния.

Метод формирования рациональной структуры системы технической эксплуатации автомобильной техники

Для формирования рациональной структуры системы технической эксплуатации АТ необходимо выделить четыре основных процесса (этапа), определяющих поддержание и обеспечение ее работоспособного состояния: техническое обслуживание (**ТО**), техническое диагностирование (**ТД**), текущий ремонт (**ТР**), обеспечение необходимого количества запасных частей (*далее* восполнение запасов (**ВЗ**)) в период выполнения обслуживания и ремонта. Для обоснования рациональной структуры системы технической эксплуатации необходимо поочередно провести декомпозицию этих процессов на действия, выполняемые обслуживающим персоналом, выбрать наиболее характерные и востребованные, определить порядок и очередность их использования [1].

Для автомобильной техники независимо от производителя устанавливают периодическое по календарю регламентированное ТО, в основу которого, как правило, положен принцип «матрешки»: каждый позже выполняемый вид обслуживания включает в себя больший объем работ и содержит мероприятия ранее выполняемого вида обслуживания. Поэтому целесообразно рассматривать вид ТО с наибольшим объемом выполняемых работ.

До начала ТО специалисты готовятся к его проведению. Данная подготовка обеспечивает обслуживающему персоналу требуемый уровень, который также задается в эксплуатационной документации на обслуживаемый автомобиль определенного образца.

При выполнении работ по техническому обслуживанию проверяется крепление деталей приборов, систем и механизмов; проводятся замена (если это требуется) фильтрующих, уплотнительных и соединительных элементов согласно перечню, указанному в эксплуатационной документации, очистительные (промывочные), смазочные работы, при необходимости – замена (доливка) охлаждающей жидкости, горюче-смазочных материалов. С использованием приборов информационно-измерительной системы автомобиля и при помощи внешних средств ТО организуется получение информации об его техническом состоянии. Подаются определенные тестовые воздействия, осуществляется сбор ответной информации (значений контролируемых параметров). Несоответствие значения параметра заданному, то есть нахождение его за установленным допуском, квалифицируется как отказ изделия. В этом случае начинает функционировать система ТД. Значения регулируемых параметров, даже если они находятся в допустимых пределах, обслуживающий персонал с использованием регулировочных работ доводит до номинальных.

Подготовка к проведению ТО содержит такие этапы, как: организация и проведение инструкторских занятий, изучение эксплуатационной документации по выполнению работ $l_1^{\text{то}}$, подготовка и проверка средств обслуживания $l_2^{\text{то}}$, оценка уровня подготовки обслуживающего персонала, необходимого для выполнения работ по ТО заданной периодичности $l_3^{\text{то}}$. Уровень подготовки специалистов может быть оценен по косвенному показателю – среднему времени ТО отдельно взятого элемента. Исполнители должны укладываться в заданные временные интервалы, указанные в эксплуатационной документации.

При непосредственном выполнении работ по обслуживанию АТ необходимо наличие знаний порядка выполнения и навыков реализации следующих операций: знание значений моментов затяжки деталей и умение выполнять крепежные работы $l_4^{\text{то}}$, знание номенклатуры заменяемых элементов и навыки в выполнении работ их замены $l_5^{\text{то}}$, знание порядка и очередности выполнения смазочных, очистительных работ и работ по замене требующих обязательной замены элементов, охлаждающих и горюче-смазочных жидкостей $l_6^{\text{то}}$. Для выполнения работ по ТО

необходимо обеспечение операций по проверке значений определенных параметров, для чего нужны знания по установлению требуемых режимов работы проверяемых элементов автомобиля, навыки в установке этих режимов $l_7^{\text{то}}$; знания номенклатуры параметров, подлежащих проверке $l_8^{\text{то}}$; характеристики этих параметров $l_9^{\text{то}}$; навыки в пользовании необходимыми средствами для измерения (определения) значений параметров $l_{10}^{\text{то}}$; знание адресов контрольных точек для подключения этих средств $l_{11}^{\text{то}}$; навыки в реализации способов измерения значений параметров $l_{12}^{\text{то}}$.

Операция определения соответствия зафиксированных значений параметров требует наличия знаний и навыков в порядке оценки полученных значений параметров $l_{13}^{\text{то}}$. Данная операция определяет, каким образом и по каким правилам необходимо сравнивать полученные значения параметров с эталонными. Аналогично операция по регулировке значений параметров требует знаний и навыков в выполнении регулировочных работ для достижения параметрами номинальных значений $l_{14}^{\text{то}}$.

В результате определения перечня необходимых знаний и навыков, которыми должны обладать специалисты, получаем вектор (кортеж) рациональной структуры системы ТО, координатами которого являются соответствующие операции:

$$H_{\text{то}} = \left(l_1^{\text{то}}, l_2^{\text{то}}, l_3^{\text{то}}, l_4^{\text{то}}, l_5^{\text{то}}, l_6^{\text{то}}, l_7^{\text{то}}, l_8^{\text{то}}, l_9^{\text{то}}, l_{10}^{\text{то}}, l_{11}^{\text{то}}, l_{12}^{\text{то}}, l_{13}^{\text{то}}, l_{14}^{\text{то}}\right). \quad (1)$$

Данный вектор определяет структуру процесса рационального ТО автомобильной техники.

Техническое диагностирование следует проводить в определенной логической последовательности действий. Процедура определения технического состояния, поиска неработоспособных элементов АТ заключается в следующем: обслуживающий персонал, в зависимости от своей технической подготовленности, формирует сигнатуру отказа диагностируемого изделия (перечень функций не обязательно одного уровня иерархии, которые в результате отказа не выполняются) для *i*-го структурного уровня. Очевидно, что продолжительность каждой операции, а отсюда и всей процедуры определения технического состояния и поиска неработоспособных элементов, напрямую зависит от квалификации обслуживающего персонала, его личного опыта, а порой и интуиции, умения находить нужную информацию, анализировать, выполнять правильные действия. Для этого специалисты должны в ходе проведения занятий изучить инструкции по выполнению работ, конструкцию диагностируемых приборов, систем и механизмов, состояние которых необходимо проверить $l_1^{\text{тд}}$, конструкцию, режимы работы средств ТД, проверить их состояние $l_2^{\text{тд}}$, знать перечень проверяемых параметров и их характеристики $l_3^{\text{тд}}$, получить оценку уровня своей подготовки $l_4^{\text{тд}}$. В ходе выполнения работ специалист должен знать режим работы диагностируемого элемента при диагностировании, иметь навыки в обеспечении этого режима $l_5^{\text{тд}}$, знать адреса контрольных точек для подключения средств ТД, уметь ими пользоваться $l_6^{\text{тд}}$, знать порядок и иметь навык в реализации способов измерения значений параметров $l_7^{\text{тд}}$, уметь выполнять оценку полученных значений параметров для определения неработоспособного элемента автомобиля и установления причины его неработоспособности $l_8^{\text{тд}}$.

В результате получаем вектор рациональной структуры системы технического диагностирования

$$H_{\text{тд}} = \left(l_1^{\text{тд}}, l_2^{\text{тд}}, l_3^{\text{тд}}, l_4^{\text{тд}}, l_5^{\text{тд}}, l_6^{\text{тд}}, l_7^{\text{тд}}, l_8^{\text{тд}}\right). \quad (2)$$

После того как неработоспособные элементы определены, обслуживающий персонал приступает к ТР.

Текущий ремонт является плановым, выполняется для обеспечения или восстановления работоспособности объекта и состоит в замене и (или) восстановлении отдельных легкодоступных его частей. В основном данный вид ремонта выполняют путем частичной разборки и замены отдельных изношенных или поврежденных деталей.

В ходе проведения инструкторских занятий специалисты должны изучить инструкции по выполнению работ, технологию замены (технологию выполнения восстановительных работ) неработоспособных деталей на работоспособные $l_1^{\text{тр}}$, изучить конструкцию, режимы работы средств ремонта, проверить их состояние $l_2^{\text{тр}}$. При выполнении ТР специалисты должны иметь знания и навыки в выполнении демонтажных, разборочных работ, работ по замене (восстановлению) неработоспособных деталей $l_3^{\text{тр}}$, знать последовательность и уметь выполнять регулировочные и настроечные работы $l_4^{\text{тр}}$.

В результате получаем вектор рациональной структуры ТР, координатами которого являются соответствующие операции:

$$H_{\text{тр}} = \left(l_1^{\text{тр}}, l_2^{\text{тр}}, l_3^{\text{тр}}, l_4^{\text{тр}}\right). \quad (3)$$

После того как неработоспособные детали конструкции АТ заменены, необходим процесс восполнения израсходованных запасных частей. Для этого необходимо иметь информацию об организациях, в которых возможно наличие необходимого количества номенклатурного (каталожного) перечня запасных частей и из которых целесообразна их доставка $l_1^{\text{вз}}$. Кроме того, специалисты должны уметь определять вид необходимых транспортных средств для осуществления транспортировки $l_2^{\text{вз}}$, их количество $l_3^{\text{вз}}$, необходимость использования, вид и количество грузоподъемного оборудования $l_4^{\text{вз}}$, текущее состояние транспортной сети $l_5^{\text{вз}}$. Эти знания и умения могут быть представлены в виде вектора

$$H_{\text{вз}} = \left(l_1^{\text{вз}}, l_2^{\text{вз}}, l_3^{\text{вз}}, l_4^{\text{вз}}, l_5^{\text{вз}}\right). \quad (4)$$

Таким образом, с учетом выражений (1) – (4) рациональная структура (**РС**) технической эксплуатации АТ будет иметь следующий вид:

$$H_{\text{рс}} = \left(H_{\text{то}}, H_{\text{тд}}, H_{\text{тр}}, H_{\text{вз}}\right) =$$

$$= \left(l_1^{\text{то}}, l_2^{\text{то}}, ..., l_{14}^{\text{то}}, l_1^{\text{тд}}, l_2^{\text{тд}}, ..., l_8^{\text{тд}}, l_1^{\text{тр}}, l_2^{\text{тр}}, ..., l_4^{\text{тр}}, l_1^{\text{вз}}, l_2^{\text{вз}}, ..., l_5^{\text{вз}}\right). \quad (5)$$

Структурная схема метода формирования рациональной системы технической эксплуатации АТ представлена на рис. 1.

Метод формирования рациональной структуры технической эксплуатации АТ учитывает уровень знаний и умений обслуживающего персонала в процессах технического обслуживания, технического диагностирования, текущего ремонта и восполнения запасов запасных частей. Использование метода позволит достигнуть наиболее эффективных показателей при организации технической эксплуатации автомобильной техники.

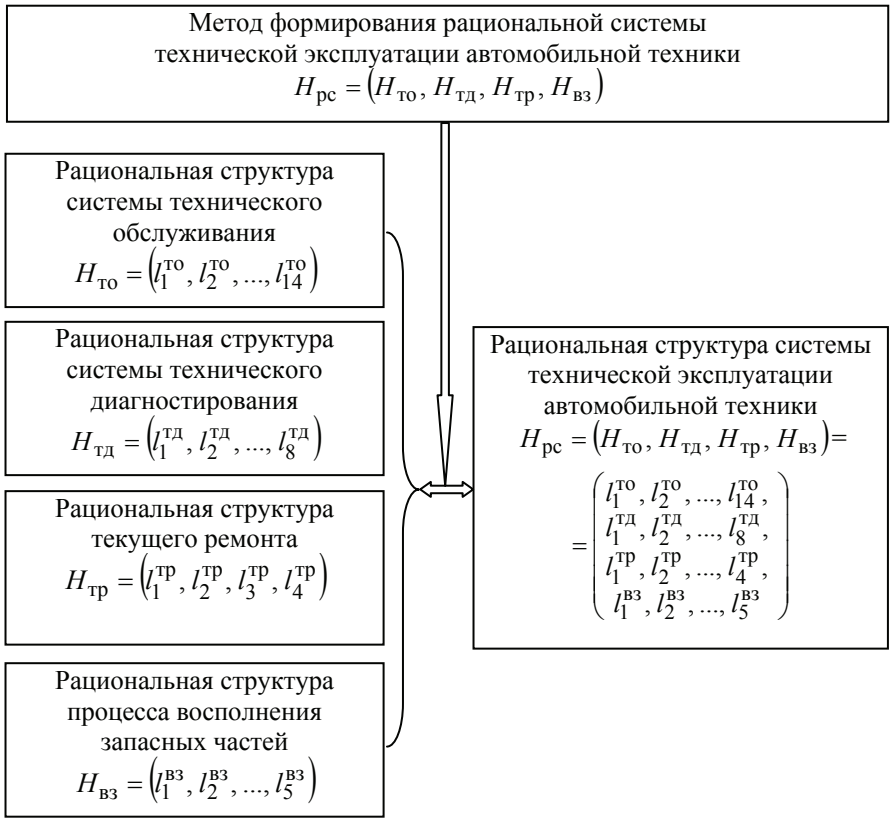


Рис. 1. Структурная схема метода формирования рациональной системы технической эксплуатации автомобильной техники

Метод поддержания работоспособного состояния автомобильной техники

Для поддержания АТ в исправном и работоспособном состоянии предназначена система ТО, которая представляет собой совокупность взаимосвязанных средств, исполнителей и документации, необходимых для предотвращения снижения эксплуатационных характеристик изделий, входящих в данную систему. Необходимость регулярно проводить ТО автомобильного транспорта, обусловлена элементарными физическими законами. В процессе эксплуатации все детали непрерывно изнашиваются, автомобиль подвергается воздействию солнечного света, влаги, пыли, постоянно испытывает перегрузки и вибрации. Специалисты по ТО с определенной периодичностью, регламентировано выполняют работы по поддержанию работоспособного состояния АТ. Организация регламентированного ТО призвана исключить появления отказов (возникающих в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта). Однако опыт эксплуатации АТ показывает, что такие случаи нередки, и к очередному обслуживанию значения некоторых параметров, определяющих работоспособность отдельно взятого образца, оказываются за допуском. В таких случаях техника некоторое время эксплуатируется в состоянии, в котором значения отдельных параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, не соответствуют требованиям, установленным в эксплуатационной документации (скрытые, постепенные отказы, которые не обнаруживаются существующими средствами функционального контроля АТ между проведением ТО.

Таким образом, техника может эксплуатироваться в соответствии с правилами безопасности дорожного движения, без каких-либо сложностей в управлении и даже имея экономическую выгоду от ее эксплуатации, но, одновременно с этим, может иметь скрытую неисправность, возникшую в период эксплуатации и определяемую только лишь в период выполнения работ очередного регламентированного технического обслуживания.

Бесспорным является утверждение о том, что техническое состояние автомобильной техники имеет многоуровневую структуру, где каждый элемент определенного уровня иерархии, как правило, решает свою функциональную задачу. Опираясь на данное утверждение, предложено описание автомобильной техники параметрическим графом технического состояния.

Построение графа основывается на следующих рассуждениях. Существует множество параметров нижнего уровня иерархии $B = \{в_1, в_2, ..., в_n\}$, где $в_1, в_2, ..., в_n$ – контролируемые параметры проверяемых элементов. Данные параметры нижнего уровня объединены в группы по функциональному признаку (выполняемым функциональным задачам), которые называются параметрами верхнего уровня иерархии, так, что $A = \{a_1, a_2, ..., a_m\}$, где $a_1, a_2, ..., a_m$ – параметры верхнего уровня, каждый из которых представляет собой подмножество множества *B*. Таких уровней может быть несколько. Данные параметры являются обобщенными и используются для определения технического состояния автомобиля. Обобщенные параметры могут стать основополагающими при постановке задач по техническому обслуживанию. Например, систематический недозаряд аккумуляторной батареи, неустойчивая работа потребителей электрической энергии на малых и средних оборотах работы коленчатого вала двигателя – это задача обслуживающему персоналу по проверке уровня прогиба ремня привода генераторной установки (так называемый физический смысл проверки) [2].

Объединяя аналогичным образом множество параметров верхнего уровня (соответствующих им функциональных задач) можно получить множество параметров следующих верхних уровней. Далее, вверх по уровню иерархии, задачи верхнего уровня будут базироваться (создаваться) на основе задач нижнего уровня, постепенно достигая более высокого уровня иерархии. Таким образом делается вывод о том, что и процесс технического обслуживания может быть описан графом $Y_{ат}$, который имеет следующие показатели: N – число уровней; Q_n – количество параметров технического состояния на n-м уровне, n = 1, 2, …, N; $W_{п.п} = \sum_{n=1}^{N} Q_n$ – количество проверяемых параметров; $W_{р.г}$ – число ребер графа. Направленный граф технического обслуживания автомобильной техники со взвешенными дугами представлен на рис. 2.

Все параметры (вершины графа) образуют множество $G = \left\{ g_{n.q_n} \middle| \, n = 1, 2, ..., N; g_n = 1, 2, ..., Q_n \right\}, |G| = W_{п.п}$. Связи параметров друг с другом (дуги графа) составляют множество $Z \subset G^2; Z = \left\{ z_r \middle| \, r = 1, 2, ..., W_{р.г} \right\} = \left\{ \left(g_i, g_j \right) \middle| \, g_i, g_j \in G; i, j = 1, 2, ..., W_{п.п}, i \neq j \right\}, |Z| = W_{р.г}$. Структуру параметрического графа технического обслуживания АТ можно выразить как:

$$Y_{ат\, N, Q_1, Q_2, ..., Q_N, W_{п.п}, W_{р.г}} = \langle G, Z \rangle_{N, Q_1, Q_2, ..., Q_N, W_{п.п}, W_{р.г}}. \quad (6)$$

Необходимо учитывать, что степень воздействия друг на друга связанных между собой параметров g различна и носит направленный характер. Параметр g_i воздействует на параметр g_j. Это воздействие можно описать, используя коэффициент связанности δ_{ij}. Справедливым будет утверждение, что в случае, если значение

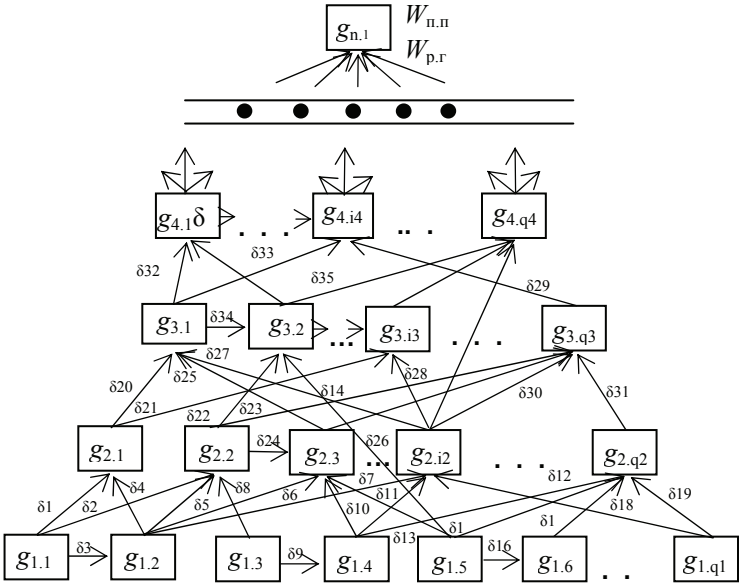


Рис. 2. Направленный параметрический граф технического обслуживания автомобильной техники

параметра g_i достигнет номинального $g_i = g_i^{н}$, то отрицательного воздействия на параметр g_j как такового не будет, воздействие будет равно 0. Уход параметра g_i от своего номинального значения влияет на значение параметра g_j с коэффициентом δ_{ij}:

$$g_j = \begin{cases} g_j + 0, & \text{при } g_i = g_i^{н}; \\ g_j + \delta_{ij}\Delta g_i, & \text{при } g_i \neq g_i^{н}, \Delta g_i = g_i - g_i^{н}. \end{cases} \quad (7)$$

Таким образом, основываясь на выражении, позволяющем описать структуру параметрического графа технического обслуживания автомобильной техники и используя коэффициент связанности, параметрический граф технического состояния примет следующий вид:

$$Y_{\text{ат}_{N, Q_1, Q_2, ..., Q_n, W_{п.п}, W_{р.г}}} = \langle G, Z' \rangle_{N, Q_1, Q_2, ..., Q_n, W_{п.п}, W_{р.г}} = \\ = \langle G, (Z, F) \rangle_{N, Q_1, Q_2, ..., Q_n, W_{п.п}, W_{р.г}}, \quad (8)$$

где F – множество коэффициентов связанности.

Любой проверяемый в процессе технического обслуживания параметр характеризуется своим номинальным и предельно допустимыми значениями, такими как наименьшее допустимое значение $g_i^{\min}$ и предельно допустимое максимальное значение $g_i^{\max}$, параметром экспоненциальной функции, значение которой распределено по нормальному закону с математическим ожиданием χ_{ai} и среднеквадратическим отклонением $\tau_{ai} : \alpha_i^n(\chi_{ai}, \tau_{ai})$, $n = 0, 1, ...,$ определяющим быстроту изменения параметра от номинального состояния с моментом определения параметра T_i. Значение параметра g_i может изменяться в период эксплуатации техники в пределах допустимого диапазона, в рамках которого обеспечивается его безотказное функционирование. Следовательно, параметр может иметь множество состояний

$$G' = \left\{ \left(g_i, \left[g^{\min}, g^{н}, g^{\max}, \alpha(\chi_a, \tau_a), T \right]_i \right) \middle| \; g_i \in G; \left[g^{\min}, g^{н}, g^{\max}, \alpha, T \right]_i \in G_к \right\},$$
$$i = 1, 2, ..., W_{п.п}, \quad (9)$$

где $G_к$ – множество состояний вида: возможные значения параметра, коэффициент крутизны изменения значения параметра, период проверки параметра.

Продолжительность выполняемых работ по поддержанию работоспособного состояния отдельного элемента или системы автомобиля (поддержанию значений параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствующим требованиям, установленным в эксплуатационной документации) является случайной величиной. Обусловлено это тем, что привлекаемые специалисты обладают различным уровнем подготовки, опытом эксплуатации определенного обслуживаемого элемента или системы, обслуживаемого образца техники в целом, психофизическими качествами.

Немаловажное значение на процесс поддержания работоспособного состояния оказывает количество специалистов, одновременно выполняющих работы. Их уровень подготовки определяет пропускную способность обслуживаемых образцов техники. Кроме того, в отличие от всех операций, составляющих процесс ТО, трудозатраты которых указаны в эксплуатационной документации, крайне сложно точно определить период времени, связанный с выполнением регулировочных работ. На случайный характер времени, необходимого для поддержания работоспособного состояния АТ, также влияют условия ее эксплуатации и проведение ТО; наличие и состояние необходимых технических средств обслуживания, запасных частей и смазочного (расходного) материала и т.д. [3].

Представленные компоненты определили основу разработанной параметрической модели системы регламентированного ТО автомобильной техники. Разработанная модель имеет следующие настраиваемые (изменяемые) параметры: номинальные, минимальные и максимальные значения параметров, среднее значение коэффициента крутизны, среднеквадратическое отклонение коэффициента крутизны, период проведения работ по поддержанию работоспособного состояния автомобиля, среднее время выполняемых работ, среднеквадратическое отклонение времени, необходимого для поддержания работоспособного состояния, количество задействованного обслуживающего персонала, коэффициент связанности параметров.

Модель реализована на языке программирования ЭВМ Object Pascal в среде Borland Delphi [4, 5] для семейства операционных систем Windows. На основе данной модели решается задача параметрического синтеза системы технического обслуживания: формирование альтернативных вариантов построения системы ТО, выбор ее предпочтительных вариантов.

Использование модели легло в основу метода поддержания работоспособного состояния автомобильной техники. Для его реализации необходимо с помощью разработанной параметрической модели смоделировать систему регламентированного технического обслуживания, сформировать альтернативные варианты ее построения, определить наиболее предпочтительные варианты, из которых выбрать наиболее оптимальный.

Метод обеспечения работоспособного состояния автомобильной техники

Метод обеспечения работоспособного состояния автомобильной техники состоит из совокупности последовательного использования методик описания формирования причин и признаков отказа, поиска и распознавания видов отказа, определения отказавшего элемента. Методы восстановления деталей, узлов, механизмов, агрегатов и систем автомобиля известны, широко применяются

и изложены в ремонтной документации на образец техники, разработанной заводом-изготовителем. Поэтому метод обеспечения работоспособного состояния направлен на минимизацию трудозатрат, снижение временных показателей и повышение экономического эффекта при обнаружении признака и причины, распознавания и определения отказавшего элемента. Его использование предполагается на начальном этапе технологического процесса текущего ремонта с последующим применением методов замены или восстановления неработоспособных элементов.

Основой обеспечения работоспособности автомобиля служит текущий ремонт, который подразумевает выполнение работ в целях обеспечения или восстановления его работоспособного состояния, состоит в замене и (или) восстановлении отдельных его частей. Потребность в ТР появляется при возникновении отказа, поэтому он выполняется по необходимости.

Прежде чем преступить к поиску неработоспособных деталей, в описываемом методе предлагается использовать методику формализованного описания формирования причин и признаков отказа. Для этого на первом этапе применения методики необходимо разработать параметрическую модель.

Основа параметрической модели для формализованного описания формирования обозначения отказа – параметрический граф технического состояния. Математически описать параметрический граф технического состояния и, следовательно, техническое состояние автомобиля можно совокупностью систем векторов наличия отказа (**НО**):

$$\begin{cases} V^1_{\text{НО}} = \left[v^1_{\text{но}\,1}\right]; \\ V^2_{\text{НО}} = \left[v^2_{\text{но}\,1}, ...v^2_{\text{но}\,2} \; ...v^2_{\text{но}\;j2} \; ...v^2_{\text{но}\,i2} \; ...v^2_{\text{но}\,q2}\right]; \\ V^3_{\text{НО}} = \left[v^3_{\text{но}\,1}, ...v^3_{\text{но}\,3} \; ...v^3_{\text{но}\;j3} \; ...v^2_{\text{но}\,i3} \; ...v^2_{\text{но}\,q3}\right]; \\ V^n_{\text{НО}} = \left[v^n_{\text{но}\,1}, ...v^n_{\text{но}\,3} \; ...v^n_{\text{но}\;jn} \; ...v^n_{\text{но}\,in} \; ...v^n_{\text{но}\,qn}\right], \end{cases} \tag{10}$$

где $V^n_{\text{НО}}$ – вектор наличия отказа *n*-го уровня иерархии параметрического графа технического состояния компонента автомобильной техники; $v^n_{\text{но}\,in}$ – *i*-й элемент вектора функционального отказа *n*-го уровня иерархии параметрического графа технического состояния компонента автомобиля; q_n – количество элементов (длина) векторов наличия отказа *n*-го уровня иерархии.

Логические выражения межуровневых связей позволят описать техническое состояние составных частей автомобильной техники:

$$\begin{cases} v^1_{\text{но}\,1} = v^2_{\text{но}\,1} \vee v^2_{\text{но}\;j2} \vee v^3_{\text{но}\,i3} \vee ... \vee v^2_{\text{но}\,q2}; \\ v^3_{\text{но}\,1} = v^4_{\text{но}\,1} \vee ... \vee v^4_{\text{но}\;j4} \vee v^3_{\text{но}\,i3} \vee ... \vee v^4_{\text{но}\,q4}; \\ v^3_{\text{но}\,3} = v^3_{\text{но}\,i3} \vee ... \vee v^3_{\text{но}\,q3}. \end{cases} \tag{11}$$

Совокупность систем векторов наличия отказов и выражения межуровневых связей элементов является параметрической моделью компонента автомобиля, основанной на параметрическом графе технического состояния.

На втором этапе реализации методики предлагается формировать признаки отказа с использованием координат векторов выражения (10). В зависимости от того, выполняются элементами составных частей автомобильной техники со-

ответствующие им функциональные задачи или нет, и соответствует ли уровень их выполнения требованиям, отображенным в эксплуатационной документации, координаты будут равны 0 – в случае удовлетворения уровня выполнения всех условий и 1 – при условии НО. Следовательно, на каждом уровне параметрического графа технического состояния (1, 2, 3 …n) путем составного перебора двоичных значений координат вектора $V_{НО}$ может быть получено множество признаков наличия различных отказов элементов автомобиля.

Использование методики поиска и распознавания отказа включает в себя два этапа. На первом этапе осуществляется построение структурно-функциональной модели составной части автомобиля, для чего проводятся [6]:

– анализ структуры (составляющие элементы механизмов, узлов, агрегатов и систем, их функциональное предназначение и степень их выполнения);

– построение параметрического графа и определение функционального назначения его элементов;

– математическое описание элементов графа и построение структурно-функциональной модели составной части автомобиля.

На втором этапе осуществляется формализация локализации отказа, которая включает:

– построение эталонной системы на базе структурно-функциональной модели;

– формирование системы в реальном состоянии;

– определение системы выявления отказа.

Для определения отказавшего элемента агрегата, механизма, узла или системы автомобиля необходимо выполнить анализ их неработоспособного состояния. Для этого разрабатывается идентификационная модель компонентов, находящихся в неработоспособном состоянии. Разработка идентификационной модели связана с необходимостью выполнения формализованного описания неработоспособных составных частей с позиции распознавания вида отказа. Исходной информацией для формирования идентификационной модели служит причина возникновения отказа. Модель представляет собой формализованное описание схем воздействия элементов неработоспособных составных частей. В каждой схеме последовательность передачи воздействия (момент, усилие, информация и т.д.) от одного элемента автомобиля к другому преобразует передачу предыдущего воздействия в последующее. Посредством реакции влияющих друг на друга элементов в схеме их воздействия образуется связь данных взаимодействий (снижение, замедление, ускорение, увеличение, преобразование и т.д.). Для описания схемы зависимых воздействий в формализованном виде вводится оператор отображения взаимодействий элементов АТ $\xrightarrow{O_n}$, где n – отдельно взятая схема воздействия элементов составной части автомобиля, которой принадлежит оператор, описывающий связь зависимых воздействий через элемент графа неработоспособного агрегата, механизма, узла или системы. В формализованном виде данная схема представлена следующим выражением:

$$O_1 \Leftrightarrow (p_i \vee ... \vee p_x) \xrightarrow{O_1} (f_{i+1} \vee ... \vee f_{x+Z}), \tag{12}$$

где O_1 – схема зависимых воздействий.

В случае, если элемент составной части АТ принимает от другого элемента (элементов) воздействие (является объектом воздействия), то представление выражения (12) происходит с использованием определения функции p_i, в противном случае элемент передает воздействие, то есть является источником передачи воздействия) представление функции происходит через значение функции f_i.

Неразрывную связь между предыдущим элементом графа и значением его функции с последующим элементом графа и значением его функции описывают

оператором логического умножения &. Схема зависимых воздействий одного элемента (воздействующего) на стоящий за ним (воздействуемый) в общем случае имеет вид

$$O_n \Leftrightarrow A_{\text{пред}} \,\&\, f_{\text{пред}} \xrightarrow[i=1]{u} O_n \quad A_{\text{послед}} \,\&\, f_{\text{послед}}, \tag{13}$$

где u – число операторов отображения в схеме; $A_{\text{пред}} \,\&\, f_{\text{пред}}$, $A_{\text{послед}} \,\&\, f_{\text{послед}}$ – формализованный вид соответственно предыдущего и последующего элементов графа и значение их функций в общей схеме.

Система из N схем зависимых воздействий в общем случае будет являться идентификационной моделью, позволяющей посредством математических преобразований определить отказавший элемент агрегата, механизма, узла или системы автомобиля.

Используя условие о выполнении элементами составной части автомобиля соответствующих им функциональных задач, f принимает значение 0, что указывает на соответствие всем требованиями, определенных эксплуатационной документацией, в противном случае, в случае отказа, f будет соответствовать 1.

Это условие определяет в формализованном виде наличие операторов цепного отображения в случае присутствия отказа в составной части автомобиля. Другими словами отсутствие отказа в формализованном виде характеризуется отсутствием операторов цепного отображения и нулевым значением в правой части выражения, описывающего схему работы данного компонента.

Заключение

Вышеизложенный материал поможет в организации процесса эксплуатации автомобильной техники, позволит снизить временные, экономические и трудозатраты при проведении технического обслуживания и текущего ремонта, восполнения необходимых израсходованных запасных частей.

Разработаны и представлены методы формирования рациональной системы технической эксплуатации автомобильной техники, поддержания и обеспечения ее работоспособного состояния.

Метод формирования рациональной системы технической эксплуатации автомобильной техники, в отличие от известных, использует декомпозицию процессов технической эксплуатации на действия по выполнению ее операций, учитывает отличительные особенности в содержании действий на различных уровнях системы технической эксплуатации, содержание нештатных ситуаций, соответствие между обязательным выполнением определенных операций и действиями специалистов при проведении технического обслуживания, текущего ремонта, процесс обеспечения необходимых запасных частей, что позволяет определить требуемую рациональную структуру технической эксплуатации автомобильной техники.

Метод поддержания работоспособного состояния автомобиля основан на создании и исследовании новой параметрической модели системы технического обслуживания. Его использование позволит определить наиболее оптимальный вариант системы технического обслуживания.

Метод обеспечения работоспособного состояния автомобильной техники создан на логически обоснованном комплексе моделей, взаимосвязь которых одновременно учитывает совокупность признаков и структуру отказа, связь элементов автомобиля с соседними элементами, функциональное назначение элементов, их воздействие друг на друга, структурные единицы диагностирования, их идентификационные и описательные атрибуты, что позволяет определять неработоспособные элементы, виды отказа, последовательности замены, требуемую диагностическую информацию.

Список литературы

1. Пат. 2708774 Российская Федерация, МПК B60S 5/00, G01M 17/00. Способ эксплуатации автомобильной техники / В. В. Нечаев ; заявитель и патентообладатель В. В. Нечаев. – № 2019114720; заявл. 13.05.2019 ; опубл. 11.12.2019, Бюл. № 35. – 11 с.

2. Нечаев, В. В. Моделирование системы регламентированного технического обслуживания автомобильной техники / В. В. Нечаев // Строительные и дорожные машины. – 2019. – № 12. – С. 37 – 40.

3. Игнатьев, С. В. Оценка эффективности функционирования и направления совершенствования процессов поддержания и обеспечения работоспособного состояния военной автомобильной техники / С. В. Игнатьев, В. В. Нечаев // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2020. – № 1-2 (139-140). – С. 36 – 42.

4. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ № 2019613352. Программа для формирования альтернативных вариантов построения системы технического обслуживания приборов, систем и механизмов двигателей военной автомобильной техники / В. В. Нечаев (РФ). Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ. – 13.03. 2019 г.

5. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ № 2020611008. Программа реализации функционирования параметрической модели системы эксплуатации военной автомобильной техники / В. В. Нечаев (РФ). Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ. – 23.01. 2020 г.

6. Нечаев, В. В. Формализованное описание процесса локализации отказа, возникающего при эксплуатации военной автомобильной техники / В. В. Нечаев, В. А. Дубовский // Вестн. военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А. В. Хрулева. – 2020. – № 1 (21). – С. 58 – 65.

Methods for Maintaining and Ensuring the Working Condition of Automotive Equipment

V. V. Nechaev

Department of Organization of Research Work and Training of Academic Personnel, nechver@mail.ru; Military Academy of Logistics named after General of the Army A. V. Khrulev, St. Petersburg, Russia

Keywords: fault detection method; methods of maintaining and ensuring usable condition; detection of faulty element; optimal version of the maintenance system; recognition of the type of failure; operation of automotive equipment.

Abstract: Methods for the formation of a rational system of technical operation of automotive equipment, maintenance and provision of its working condition are presented.

References

1. Nechayev V.V. *Sposob ekspluatatsii avtomobil'noy tekhniki* [Way of exploitation of automobile equipment], Russian Federation, 2019, Pat. 2708774. (In Russ.)

2. Nechayev V.V. [Modeling of the system of regulated technical maintenance of automobile equipment], *Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny* [Construction and road machines], 2019, no. 12, pp. 37-40. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Ignat'yev S.V., Nechayev V.V. [Evaluation of the efficiency of functioning and the direction of improving the processes of maintaining and ensuring the working state of military vehicles], *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskiye sredstva protivodeystviya terrorizmu* [Questions of defense technology. Series 16: Technical means of countering terrorism], 2020, no. 1-2 (139-140, pp. 36-42. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Nechayev V.V. *Programma dlya formirovaniya al'ternativnykh variantov postroyeniya sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya priborov, sistem i mekhanizmov dvigateley voyennoy avtomobil'noy tekhniki* [Program for the formation of alternative options for building a system for the maintenance of devices, systems and mechanisms of engines of military vehicles], Russian Federation, 2019, Certificate of state registration of computer programs No. 20196133525. (In Russ.)

5. Nechayev V.V. *Programma realizatsii funktsionirovaniya parametricheskoy modeli sistemy ekspluatatsii voyennoy avtomobil'noy tekhniki* [Program for the implementation of the functioning of the parametric model of the system for the operation of military vehicles], Russian Federation, 2020, Certificate of state registration of computer programs No. 2020611008. (In Russ.)

6. Nechayev V.V., Dubovskiy V.A. [Formalized description of the process of localization of a failure arising from the operation of military vehicles], *Vestnik voyennoy akademii material'no-tekhnicheskogo obespecheniya im. generala armii A. V. Khruleva* [Bulletin of the Military Academy of Material and Technical Support. General of the Army A. V. Khrulev], 2020, no. 1 (21), pp. 58-65. (In Russ., abstract in Eng.)

Methoden zur Aufrechterhaltung und Sicherung des funktionierenden Zustands der Fahrzeugtechnik

Zusammenfassung: Es sind die Methoden der Bildung eines rationalen Systems für den technischen Betrieb von Kraftfahrzeugausrüstung, zur Wartung und Bereitstellung ihres Betriebszustands vorgestellt.

Méthodes de maintien et d'exploitation dans la technique d’automobile

Résumé: Sont présentées les méthodes de la formation d'un système rationnel de l'exploitation technique de la technologie automobile, de maintien et d'assurance de son état de fonctionnement.

Автор: ***Нечаев Виталий Викторович*** **–** кандидат технических наук, доцент, отдел организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров, ФГКВОУ ВО «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева», г. Санкт-Петербург, Россия.

Рецензент: ***Ведищев Сергей Михайлович*** **–** доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Агроинженерия», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

УДК 004.021
DOI: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.472-482

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ УСТАНОВКИ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ЦИНКОВАНИЯ МЕЛКИХ ДЕТАЛЕЙ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ В НАСЫПНОМ ВИДЕ

В. А. Немтинов[1], М. А. Матрохин[1], Ю. В. Немтинова[1,2], А. В. Крылов[1]

Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» (1), kafedra@mail.gaps.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ»; кафедра менеджмента, маркетинга и рекламы (2), ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», г. Тамбов, Россия

Ключевые слова: гальваническое цинкование; конструкторская разработка; мелкие детали черных металлов в насыпном виде; опытный образец; установка; электронная модель.

Аннотация: Выполнен анализ технологических процессов гальванического покрытия деталей черных металлов. Представлены результаты конструкторской разработки усовершенствованной установки гальванического цинкования мелких деталей черных металлов в насыпном виде. Предложена технология гальванического цинкования мелких деталей черных металлов в насыпном виде, проведены расчеты по определению размеров конструктивных элементов и разработана электронная модель установки. На основе электронной модели и чертежей изготовлен экспериментальный образец установки, реализующей данный процесс. Апробация установки на примере производства партии разнообразных мелких деталей показала высокую ее эффективность и перспективы использования для целого класса изделий из черных металлов.

Введение

В настоящее время гальваническое цинкование является самым массовым покрытием, используемым для антикоррозионной защиты черных металлов. Это связано с тем, что по совокупности экономических, экологических, технологических и физико-химических факторов у горячего и гальванического цинкования практически нет конкурентов.

Цинкованием гальваническим называется процесс нанесения тонкого слоя цинка на поверхность металлических изделий в растворе электролита. В процессе электролиза цинк растворяется, и его ионы с положительным потенциалом оседают на поверхность основного металла с формированием слоя толщиной 4…20 мкм, с высокой точностью повторяющего контуры изделия. Покрытие, созданное гальваническим цинкованием, особенно точное и гладкое.

Гальваническое цинкование выполняется методом электролиза с расходуемым анодом. В роли катода, как и во всей гальванике металлов, выступает обрабатываемое изделие, а в качестве анода используют пластины чистого цинка, размещаемые по установке так, чтобы обеспечить равномерность потока анионов

к покрываемой поверхности. Основными реагентами в составе электролита в общем случае являются сернокислый и хлористый цинк, а также фторборат цинка. Для улучшения параметров гальванического цинкования в раствор также вводят соли натрия, калия и алюминия. Скорость осаждения и максимальная толщина слоя цинка регулируется плотностью тока, которая зависит от состава гальванического раствора и его температуры. По способу нанесения покрытия цинкование делится на горячее, холодное, газотермическое и термодиффузионное [1 – 3].

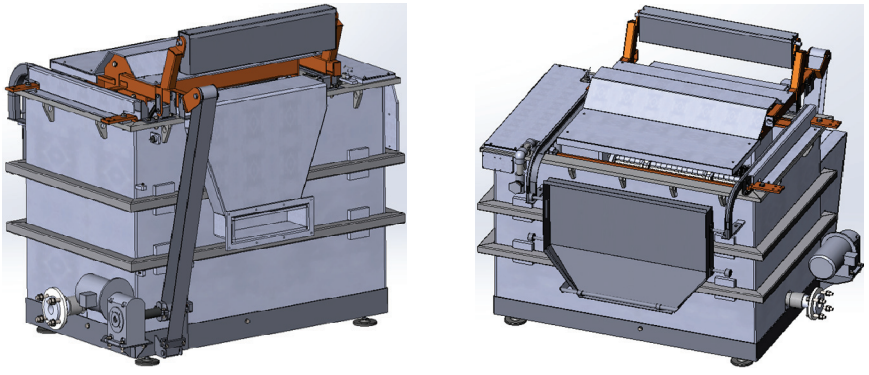
Обрабатываемыми деталями могут быть болты, винты, гайки, шайбы, резьбовые вставки, втулки, гвозди, пружины и многое др. Покрытие таких мелких изделий в насыпном виде значительно удобнее и быстрее, чем с использованием технологических подвесок.

В работе рассмотрены вопросы усовершенствования конструкции установки гальванического цинкования мелких деталей черных металлов в насыпном виде.

Конструкторская разработка установки

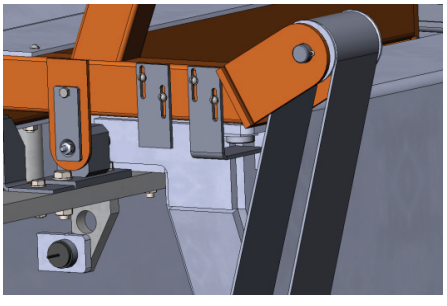
Установка гальванического цинкования мелких деталей черных металлов в насыпном виде совмещает в себе гальваническую ванну со встроенным вращающимся барабаном, вентиляцией, выдвижным лотком, блоком электрических нагревателей, датчиками температуры и уровня, электромонтажным коробом и механизмом поднятия барабана для выгрузки [3, 4].

На основе результатов работ [5 – 12] создана электронная модель установки. Общий 3D-вид модели и отдельных основных узлов установки приведены на рис. 1, 2.



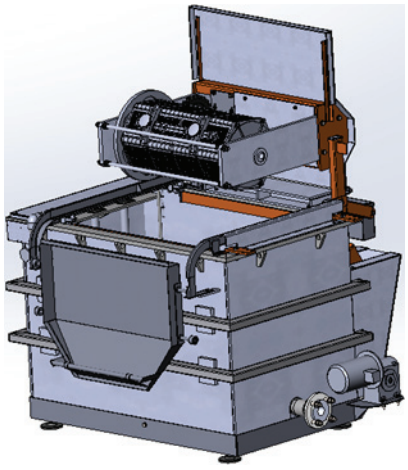
а) *б*)

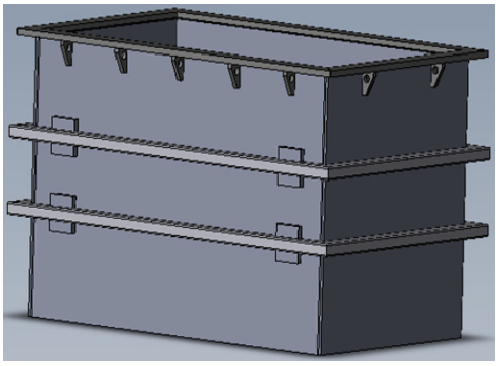
Рис. 1. Общий 3D-вид установки сзади (*а*) и спереди (*б*)



а)

Рис. 2. 3D-вид узлов установки (начало):
а – с датчиками и флажками остановки





б) *в*)

Рис. 2. Окончание:
б – с поднятым гальваническим барабаном; *в* – корпус с поясами жесткости

Разработка механизма подъема барабана установки

В век «механизации» и «автоматики» ручные механизмы уступают автоматическим, в том числе электрическим, пневматическим, гидравлическим [13 – 15].

Предложение изменения ручного подъема барабана обуславливается, в первую очередь, быстротой и автоматизацией процесса, а также исключением физического труда при подъеме достаточно тяжелой конструкции гальванического барабана с деталями.

При использовании пневматического или гидравлического механизма подъема необходимо учитывать дороговизну устройств, а также наличие компрессорных установок для пневматики и маслостанций для гидравлики.

Принцип подъема барабана электроприводом заключается в процессе намотки ремня передачи на бобину по команде оператора – нажатием кнопки «подъем» на пульте стационарного блока, установленного на корпусе установки или в отдельном шкафу управления.

При завершении процесса цинкования оператор, нажав кнопку на пульте, дает команду приводу поднять барабан, при этом не давая команды останавливать само вращение барабана внутри установки, что дает деталям внутри барабана, перемешиваясь, стряхивать с себя капли раствора. По прошествии некоторого времени (2–3 мин) оператор останавливает барабан в нависшем состоянии, для того чтобы подогнать лоток для выгрузки деталей.

На борту корпуса установки находится жесткозакрепленная металлическая рама барабана. Также для обеспечения равновесия барабана на раме установлен противовес. Это способствует меньшему натяжению ремня при удержании рамы и барабана в горизонтальном положении. Рама поднимает и опускает барабан при помощи натяжения и ослабления ремня, что в свою очередь влияет на напряжение материала борта и стенки установки. Чтобы не происходило деформации стенки установки, при достижении горизонтального положения барабана нужно остановить привод подъема. Помимо ручной остановки (нажатие кнопки на пульте управления), страховкой на этот случай служат два датчика «занятости позиций», которые настроены на контакт с металлическими «флажками» на верхнюю и нижнюю «контрольные» точки. При прохождении сигнала, на замыкание пластины с датчиком, отдается команда на остановку вращения привода подъема (см. рис. 2, *а*).

Получив сигнал при пересечении металлического флажка и датчика, привод останавливает натяжение, подъем барабана прекращается. В обратном порядке происходит опускание барабана. При достижении горизонтального положения рамы, уловив сигнал от датчика, привод подъема барабана прекращает вращение бобины и «размотки» ремня, в противном случае бобина начнет наматывать ремень в противоположную сторону, что приведет к дальнейшему подъему барабана (см. рис. 2, *б*).

Разработка корпуса установки

Основной и несущей конструкцией является корпус установки. Конструкторская разработка корпуса установки гальванического цинкования мелких деталей черных металлов в насыпном виде осуществлена с конструктивными параметрами, оптимальными для деталей длиной до 100 мм и диаметром не менее 4 мм.

Материал корпуса выбирался исходя из агрессивности основной среды в установке. При использовании металлической конструкции необходимо было ее обезопасить в плане коррозионной стойкости. Для этого использовали полимерное покрытие с внутренней стороны корпуса в частности ПХ-2, что в свою очередь удорожает и усложняет изготовление корпуса.

Полипропилен имеет ряд преимуществ перед металлом: обработка деталей корпуса, метод сваривания (экструзионный, газовый метод сварки); стойкость полипропилена к агрессивным средам внутри установки по сравнению с металлом; легко очищается и на нем не скапливается пыль и грязь (за счет этого уменьшается периодичность технических осмотров).

На основании вышеизложенного проведены расчеты на прочность стенок корпуса установки из полипропилена, усиленного поясами жесткости. Корпус установки с внутренними размерами 1300×780×700, объемом раствора 0,71 м^3.

Исходные данные.

Внутренние размеры установки (длина × ширина × высота) – 1300×780×700 мм.

Материал – полипропилен. Среда – цинк хлористый технический с концентрацией 20…80 г/л, алюминий хлористый с концентрацией 180…240 г/л, плотность раствора $\rho = 1{,}2\cdot10^3$ кг/м^3. Высота столба жидкости – $H_ж$= 0,55 м; $\beta_{н.д}$ – номинальное допускаемое напряжение, $\beta_{н.д} = \sigma_т/n_т$. Предел текучести для стали 12Х18Н10Т (пояс) $\sigma_т$ = 240 МН/м^2, запас прочности $n_т$ = 1,65; $\beta_{н.д} = 240 : 1{,}65 = 145$ МН/м^2.

Расчет толщины стенки корпуса установки.

P – гидростатическое давление, $P = P_с + g\rho H_ж\times10^{-6}$ МН/м^2, где избыточное давление $P_с = 0$; g = 9,81 м/с^2; высота столба жидкости $H_ж$ = 0,55 м.

$P = 9{,}81\cdot1{,}2\cdot10^3\cdot0{,}55\cdot10^{-6} = 0{,}065$ МН/м^2.

Положение по вертикали горизонтальных ребер определяем по формулам:

$H_1 = 0{,}23H_ж = 0{,}1265$ м, принимаем 0,125 м;

$H_2 = 0{,}6H_ж = 0{,}33$ м, принимаем 0,35 м.

Расчет давления на стенку корпуса установки осуществляется по формуле

$P_1 = P_ж = P_с + g\,\rho\,H_ж\times10^{-6} = 0{,}065$ МН/м^2.

Толщина стенки без укрепления определяется по формуле

$$S = KH_1\sqrt{\frac{H_1}{\beta_{н.д}}} = 0{,}0077 \text{ м},$$

где K – коэффициент, зависящий от способа закрепления стенки.

С учетом округления принимаем толщину стенки S = 0,015 м.

Определение необходимого момента сопротивления укрепляющего ребра.

$W = (0{,}039\cdot10^{-6}g\rho H_ж(H_ж - H_2)b^2) / \beta_{н.д} = (0{,}039\cdot10^{-6}\cdot9{,}8\cdot1{,}2\cdot10^3\cdot0{,}55(0{,}55 - 0{,}35)\cdot1{,}3^2) - / 145 = 0{,}0000059$ м^3, где b – ширина стенки. Выбрана труба 60×40×3 ГОСТ 8645–68 с $W = 0{,}00000686$ м^3.

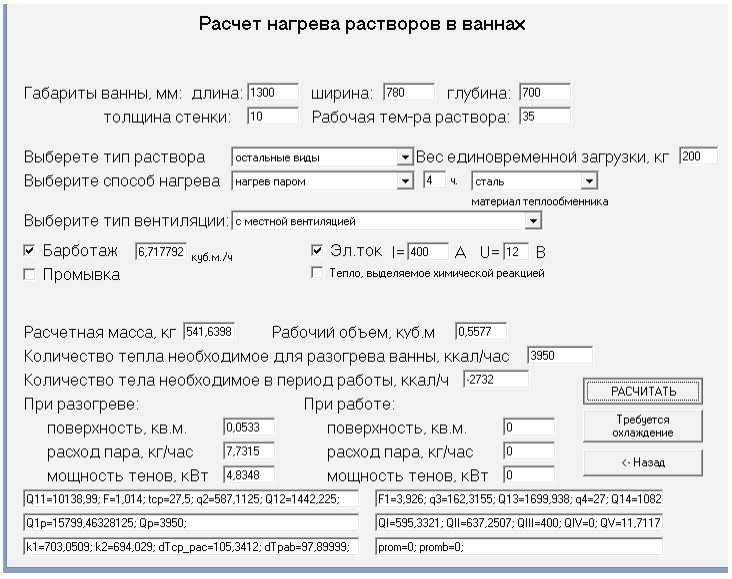
Расчет технологических параметров процесса гальванического цинкования и количества расходных материалов

Для определения технологических параметров процесса гальванического цинкования мелких деталей черных металлов в насыпном виде и количества расходных материалов проведены следующие расчеты:

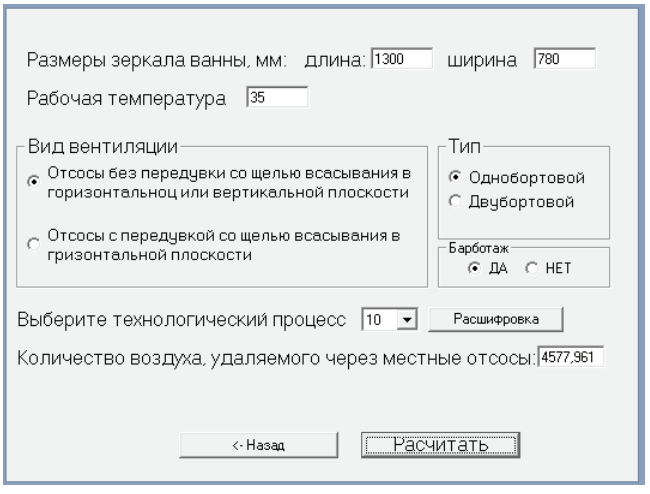
– поверхности нагревателя, расхода энергоносителей, мощности тэнов, количества воздуха удаляемого стационарной вентиляцией;

– количества воздуха, идущего на барботаж.

В качестве примера на рис. 3 приведены результаты расчета нагрева растворов в ванне установки и количества удаляемого воздуха.



а)



б)

Рис. 3. Фрагмент результатов расчета технологических характеристик процесса гальванического цинкования:

а – нагрева раствора в ванне установки; *б* – количества удаляемого воздуха

Данную установку возможно использовать для разных видов цинкования – щелочного, кислого, цианистого, а также никелирования и серебрения, доосна-стив установку покрытия змеевиками охлаждения, при протекании данных операций с повышением теплового режима.

Результаты испытаний технологической установки

Проектно-конструкторская работа проведена на основе результатов работ [16 – 19] с использованием системы трехмерного моделирования SolidWorks, а также создания чертежей. Таким образом, конструкция установки выполнена максимально ресурсоемкой, так как, по сравнению с другими видами реализации процесса гальванического цинкования мелких деталей черных металлов в насыпном виде, удалось сократить в два раза время процесса, уменьшить расходы на изготовление готовых установок за счет совмещения многих операций цикла цинкования.

Все это удешевляет сборку готовых установок, по сравнению с установками с пневматическим и гидравлическим подъемами, приблизительно на 200 тыс. р. в расчете на один экземпляр по сравнению с аналогичной установкой, а также позволяет размещать данные установки в малогабаритных помещениях «гаражного типа». Предложенная конструкция удешевляет себестоимость операции гальванического цинкования мелких деталей черных металлов в насыпном виде в сравнении с полноценной гальванической линией цинкования.

На основе электронной модели и чертежей изготовлен экспериментальный образец установки, реализующей данный процесс. Опытная эксплуатация установки проведена на АО «ТАГАТ» им. С. И. Лившица при производстве партии мелких деталей разнообразной формы (рис. 4).

Испытания деталей с антикоррозионной обработки, покрытие которых выполнено с использованием установки гальванического цинкования мелких деталей черных металлов в насыпном виде, на стойкость к разнообразным агрессивным средам, показали хорошие результаты.

Если гальваническое цинкование мелких деталей проводится при технологических режимах, отличных от оптимальных, может появиться дефект неравномерного покрытия (в случае медленного или очень быстрого вращения барабана).

Кроме того, для мелких обрабатываемых деталей (болтов, винтов, гаек, шайб, втулок, гвоздей и др.) покрытие в насыпном виде значительно удобнее и быстрее, чем с использованием технологических подвесок. Качество покрытий отличается большей стабильностью в пределах партий, выполненных без переналадки установки.

а) *б*)

Рис. 4. Фотографии партии мелких деталей в насыпном виде:
а – до цинкования; *б* – после цинкования

Заключение

В работе решены вопросы усовершенствования конструкции установки гальванического цинкования мелких деталей черных металлов в насыпном виде, в частности: проведены расчеты по определению конструктивных элементов установки, выполнены проектно-конструкторская разработка и изготовление экспериментального образца установки, реализующей данный процесс. Апробация установки на примере производства партии мелких деталей разнообразной формы показала высокую ее эффективность и перспективы использования для целого класса мелких деталей черных металлов.

Список литературы

1. Ильин, В. А. Цинкование, кадмирование, оловянирование и свинцевание / В. А. Ильин ; под ред. П. М. Вячеславова. –5-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, 1983. – 87 с.
2. Окулов, В. В. Цинкование. Техника и технология / В. В. Окулов ; под ред. В. Н. Кудрявцева. – М. : Глобус, 2008. – 252 с.
3. Nemtinov, V. Automation of the Early Stages of Plating Lines Design / V. Nemtinov, N. Bolshakov, Yu. Nemtinova // MATEC Web of Conferences : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, 11 – 15 сентября 2017 г., Севастополь. – Франция : EDP Sciences, 2017. – Vol. 129, No. 7. – 01012 (4 с.). doi: 10.1051/matecconf/201712901012
4. Решение проблемы оптимального синтеза технологических процессов сложных систем / Е. Н. Малыгин, В. А. Немтинов, Ж. Е. Зимнухова, Ю. В. Немтинова // Вестн. Тамб. ун-та. Серия: Естественные и технические науки. – 2002. – Т. 7, № 2. – С. 242 – 245.
5. Моделирование объектов коммунальных систем / В. А. Немтинов, В. Г. Мокрозуб, П. И. Пахомов, К. В. Немтинов // Вестн. компьютерных и информационных технологий. – 2010. – № 7 (73). – С. 35 – 39.
6. Ерёмин, А. А. Расширенная модель сложности конструктивного элемента электронной модели изделия / А. А. Ерёмин, О. А. Ямникова // Инновационная наука. – 2015. – Т. 2, № 4. – С. 23 – 26.
7. Рыбина, Г. В. Применение интеллектуального анализа данных для построения баз знаний интегрированных экспертных систем / Г. В. Рыбина // Авиакосмическое приборостроение. – 2012. – № 11. – С. 36 – 53.
8. Виртуальное моделирование химико-технологических систем. Состояние проблемы : монография / В. А. Немтинов, С. В. Карпушкин, В. Г. Мокрозуб [и др.]. – Тамбов : Издат. дом ТГУ им. Г. Р. Державина, 2010. – 236 с.
9. Методы и алгоритмы создания виртуальных моделей химико-технологических схем : монография / В. А. Немтинов, С. В. Карпушкин, В. Г. Мокрозуб [и др.]. – Тамбов : Издат. дом ТГУ им. Г. Р. Державина, 2011. – 282 с.
10. Прототип виртуальной модели учебно-материальных ресурсов университета химико-технологического профиля : монография / В. А. Немтинов, С. В. Карпушкин, В. Г. Мокрозуб [и др.]. – Тамбов : Издат. дом ТГУ им. Г. Р. Державина, 2012. – 436 с.
11. Информационные технологии при создании пространственно-временных моделей объектов культурно-исторического наследия : монография / В. А. Немтинов, А. А. Горелов, П. А. Острожков [и др.]. – Тамбов : Издат. дом ТГУ им. Г. Р. Державина, 2013. – 213 с.
12. Немтинов, В. А. Информационный анализ и моделирование объектов природно-промышленной системы : монография / В. А. Немтинов. – М. : Машиностроение-1, 2005. – 112 с.

13. Пахомов, П. И. Технология поддержки принятия решений по управлению инженерными коммуникациями : монография / П. И. Пахомов, В. А. Немтинов. – М. : Машиностроение, 2009. – 124 с.

14. Борисенко, А. Б. Иерархия задач аппаратурного оформления технологических систем многоассортиментных химических производств / А. Б. Борисенко, С. В. Карпушкин // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2014. – № 3. – С. 113 – 123. doi: 10.7868/S0002338814030044

15. Мокрозуб, В. Г. Постановка задачи разработки математического и информационного обеспечения процесса проектирования многоассортиментных химических производств / В. Г. Мокрозуб, Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 252 – 264. doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.252-264

16. Мокрозуб, В. Г. Информационно-логические модели технических объектов и их представление в информационных системах / В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов, С. Я. Егоров // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2010. – № 3. – С. 68 – 73.

17. Мокрозуб, В. Г. Системный анализ процессов принятия решений при разработке технологического оборудования / В. Г. Мокрозуб, Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 364 – 373. doi: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.364-373

18. Краснянский, М. Н. Математическое моделирование адаптивной системы управления профессиональным образованием / М. Н. Краснянский, А. И. Попов, А. Д. Обухов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 196 – 208. doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.196-208

19. ГОСТ 23738–85 Ванны автооператорных линий для химической, электрохимической обработки поверхности и получения покрытий. Основные параметры и размеры. – Взамен ГОСТ 23738–79 ; введ. 1985-03-26. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 19 с.

Improving the Design of the Device for Galvanic Coating of Small Parts of Ferrous Metals in Bulk

V. A. Nemtinov[1], M. A. Matrokhin[1], Yu. V. Nemtinova[1,2], A. V. Krylov[1]

Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering (1),
kafedra@mail.gaps.tstu.ru; TSTU;
Department of Management, Marketing and Advertising (2),
G. R. Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia

Keywords: galvanized zinc; design development; small parts of ferrous metals in bulk; prototype; installation; electronic model.

Abstract: The analysis of the processes of galvanic coating of ferrous metal parts is carried out. The results of the design development of an improved installation for galvanic coating of small parts of ferrous metals in bulk are presented. The technology of galvanic coating of small parts of ferrous metals in bulk is proposed, calculations are carried out to determine the dimensions of structural elements and an electronic model of the installation is developed. On the basis of the electronic model and drawings, an experimental prototype of the installation was made that implements this process. The approbation of the installation, using the example of the production of a batch of various small parts has shown its high efficiency and prospects for use for a whole class of products made of ferrous metals.

References

1. Il'in V.A., Vyacheslavov P.M. [Ed.] *Tsinkovaniye, kadmirovaniye, olovyanirovaniye i svintsevaniye* [Zinkovanie, cadmium plating, tinning and lead], Leningrad: Mashinostroyeniye, 1983, 87 p. (In Russ.)

2. Okulov V.V., Kudryavtsev V.N. [Ed.] *Tsinkovaniye. Tekhnika i tekhnologiya* [Zinc-plating. Technique and technology], Moscow: Globus, 2008, 252 p. (In Russ.)

3. Nemtinov V., Bolshakov N., Nemtinova Yu. Automation of the Early Stages of Plating Lines Design, *MATEC Web of Conferences*: *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment*, 11 - 15 September 2017, Sevastopol, France: EDP Sciences, 2017, vol. 129, no. 7, 01012 (4 p.), doi: 10.1051/matecconf/201712901012

4. Malygin Ye.N., Nemtinov V.A., Zimnukhova Zh.Ye., Nemtinova Yu.V. [Solution of the problem of optimal synthesis of technological processes of complex systems], *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki* [Bulletin of the Tambov University. Series: Natural and technical sciences], 2002, vol. 7, no. 2, pp. 242-245. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Nemtinov V.A., Mokrozub V.G., Pakhomov P.I., Nemtinov K.V. [Modeling of objects of communal systems], *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Bulletin of computer and information technologies], 2010, no. 7 (73), pp. 35-39. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Yeromin A.A., Yamnikova O.A. [Extended model of the complexity of the structural element of the electronic model of the product], *Innovatsionnaya nauka* [Innovative Science], 2015, vol. 2, no. 4, pp. 23-26. (In Russ.)

7. Rybina G.V. [Application of data mining for the construction of knowledge bases of integrated expert systems], *Aviakosmicheskoye priborostroyeniye* [Avia-space instrument-making], 2012, no. 11, pp. 36-53. (In Russ., abstract in Eng.)

8. Nemtinov V.A., Karpushkin S.V., Mokrozub V.G., Malygin Ye.N., Yegorov S.Ya., Krasnyanskiy M.N., Borisenko A.B., Nemtinova Yu.V. *Virtual'noye modelirovaniye khimiko-tekhnologicheskikh sistem. Sostoyaniye problemy: monografiya* [Virtual modeling of chemical-technological systems. State of the problem: monograph], Tambov: Izdatel'skiy dom TGU im. G. R. Derzhavina, 2010, 236 p. (In Russ.)

9. Nemtinov V.A., Karpushkin S.V., Mokrozub V.G., Malygin Ye.N., Yegorov S.Ya., Krasnyanskiy M.N., Borisenko A.B., Nemtinova Yu.V. *Metody i algoritmy sozdaniya virtual'nykh modeley khimiko-tekhnologicheskikh skhem: monografiya* [Methods and algorithms for creating virtual models of chemical-technological schemes: monograph], Tambov: Izdatel'skiy dom TGU im. G. R. Derzhavina, 2011, 282 p. (In Russ.)

10. Nemtinov V.A., Karpushkin S.V., Mokrozub V.G., Malygin Ye.N., Yegorov S.Ya., Krasnyanskiy M.N., Borisenko A.B., Nemtinova Yu.V. *Prototip virtual'noy modeli uchebno-material'nykh resursov universiteta khimiko-tekhnologicheskogo profilya: monografiya* [The prototype of the virtual model of the educational material resources of the University of chemical and technological profile: monograph], Tambov: Izdatel'skiy dom TGU im. G. R. Derzhavina, 2012, 436 p. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Nemtinov V.A., Gorelov A.A., Ostrozhkov P.A., Manayenkov A.M., Nemtinova Yu.V., Morozov V. V., Gorelov I. A., Nemtinov K. V. *Informatsionnyye tekhnologii pri sozdanii prostranstvenno-vremennykh modeley ob"yektov kul'turno-istoricheskogo naslediya: monografiya* [Information technologies in the creation of space-time models of objects of cultural and historical heritage: monograph], Tambov: Izdatel'skiy dom TGU im. G. R. Derzhavina, 2013, 213 p. (In Russ.)

12. Nemtinov V.A. *Informatsionnyy analiz i modelirovaniye ob"yektov prirodno-promyshlennoy sistemy: monografiya* [Information analysis and modeling of natural-industrial system objects: monograph], Moscow: Mashinostroyeniye-1, 2005, 112 p. (In Russ.)

13. Pakhomov P.I., Nemtinov V.A. *Tekhnologiya podderzhki prinyatiya resheniy po upravleniyu inzhenernymi kommunikatsiyami: monografiya* [Decision support technology for management of engineering communications: monograph], Moscow: Mashinostroyeniye, 2009, 124 p. (In Russ.)

14. Borisenko A.B., Karpushkin S.V. [The hierarchy of tasks for the hardware design of technological systems of multi-assortment chemical production], *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems], 2014, no. 3, pp. 113-123, doi: 10.7868/S0002338814030044 (In Russ., abstract in Eng.)

15. Mokrozub V.G., Malygin Ye.N., Karpushkin S.V. [Statement of the problem of developing mathematical and informational support for the design process of multi-assortment chemical productions], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 252-264, doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.252-264 (In Russ., abstract in Eng.)

16. Mokrozub V.G., Nemtinov V.A., Yegorov S.Ya. [Information-logical models of technical objects and their representation in information systems], *Informatsionnyye tekhnologii v proyektirovanii i proizvodstve* [Information technologies in design and production], 2010, no. 3, pp. 68-73. (In Russ., abstract in Eng.)

17. Mokrozub V.G., Malygin Ye.N., Karpushkin S.V. [A system analysis of decision-making processes during the development of technological equipment], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 3, pp. 364-373, doi: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.364-373 (In Russ., abstract in Eng.)

18. Krasnyanskiy M.N., Popov A.I., Obukhov A.D. [Mathematical modeling of the adaptive management system of vocational education], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 196-208, doi: 10.17277/ vestnik.2017.02.pp.196-208 (In Russ., abstract in Eng.)

19. *GOST 23738-85 Vanny avtooperatornykh liniy dlya khimicheskoy, elektrokhimicheskoy obrabotki poverkhnosti i polucheniya pokrytiy. Osnovnyye parametry i razmery* [GOST 23738–85 Baths of auto-operator lines for chemical, electrochemical surface treatment and obtaining coatings. Basic parameters and dimensions], Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1985, 19 p. (In Russ.)

Verbesserung der Konstruktion der Anlage der galvanischen Verzinkung von Kleinteilen der Eisenmetalle in loser Schüttung

Zusammenfassung: Es ist die Analyse der technologischen Prozesse der galvanischen Beschichtung von Eisenmetallteilen durchgeführt. Die Ergebnisse der Entwurfsentwicklung der verbesserten Anlage zum galvanischen Verzinken kleiner Teile von Eisenmetallen in loser Schüttung sind vorgestellt. Die Technologie der galvanischen Verzinkung kleiner Teile von Eisenmetallen in loser Schüttung ist vorgeschlagen, Berechnungen zur Bestimmung der Abmessungen von Strukturelementen sind durchgeführt, das elektronische Modell der Anlage ist entwickelt. Auf der Grundlage des elektronischen Modells und der Zeichnungen ist der experimentelle Prototyp der Installation erstellt, der diesen Prozess implementiert. Die Approbation der Anlage am Beispiel der Herstellung einer Charge verschiedener Kleinteile hat ihre hohe Effizienz und Aussichten für die Verwendung für eine ganze Klasse von Produkten aus Eisenmetallen gezeigt.

Perfectionnement de la conception de l'installation de galvanization de petites pièces des métaux ferreux en vrac

Résumé: Est faite une analyse des processus technologiques de galvanoplastie des pièces de métaux ferreux. Sont présentés les résultats de la conception de l'installation améliorée de galvanisation par la galvanisation de petites pièces des métaux ferreux en vrac. Est proposée la technologie de la galvanisation de petites pièces des métaux ferreux en vrac; sont effectués des calculs pour déterminer la mesure des éléments structurels; est mis au point un modèle d'une installation électronique. A la base du modèle électronique et des dessins est fabriqué un échantillon expérimental de l'installation mettant en œuvre ce processus. L'essai de l'installation à l'exemple de la production d'un lot de diverses petites pièces a montré son efficacité élevée et ses avantages pour toute une classe de produits en métaux ferreux.

Авторы: ***Немтинов Владимир Алексеевич*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ»; ***Матрохин Михаил Александрович*** – магистрант; ***Немтинова Юлия Владимировна*** – кандидат экономических наук, старший научный сотрудник кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ»; доцент кафедры менеджмента, маркетинга и рекламы, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина»; ***Крылов Алексей Викторович*** – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: ***Мокрозуб Владимир Григорьевич*** **–** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

УДК 691.328.1
DOI: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.483-495

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ СЦЕПЛЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО ГЕЛЯ МЕЖДУ АРМАТУРОЙ И БЕТОНОМ

А. Н. Николюкин, В. П. Ярцев, С. А. Мамонтов, И. И. Коломникова, А. С. Печников, Н. О. Никитин

Кафедра «Конструкции зданий и сооружений», valax1@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия

Ключевые слова: арматура; бетон; математическая модель; сцепление; численный метод.

Аннотация: Нарушение сцепления арматуры с бетоном вызывает значительные деформации конструкции, что впоследствии может привести к потере ее несущей способности. Возникает необходимость в изучении процесса сцепления между бетоном и арматурой при различных воздействиях. Представлены результаты численного эксперимента по испытанию на выдергивание арматуры периодического профиля из бетона. Построена математическая модель, позволяющая изучить процессы, протекающие в области заделки арматуры в бетон. Рассмотрены результаты численного моделирования.

Сцеплением называется способность арматуры под нагрузкой сопротивляться проскальзыванию в железобетонных изделиях. Железобетон рассматривается как единый композиционный материал до того момента, пока существует сцепление по контактной поверхности между арматурой и бетоном. При нарушении сцепления конструкция перестает существовать как единое целое.

Впервые про оценку прочности анкеровки арматуры заговорил немецкий исследователь Р. Залигер в начале XX века [1]. Первоначально их опыты были направлены на проверку прочности анкеровки арматуры в бетоне для концевых усилений отгибов, петель и крюков [2]. Данный метод позволил исследовать анкеровку за счет сцепления профиля с бетоном, обладающим высокой прочностью. При этом сцепление рассматривалось в качестве силовой характеристики, зависящей от многих факторов, удельное значение которых оценивалось учеными неоднозначно. Тем не менее в середине XX века Я. В. Столяров предположил, что сцепление напрямую зависит от клеящей способности цементного геля и трения, возникающего между материалами под действием радиального давления от усадки бетона.

В своих трудах Я. В. Столяров выделил две группы факторов [3]. Первая группа отражает факторы, влияющие на сопротивление скольжению арматуры в бетоне. К ним относятся зацепление выступов за бетон, трение от усадки и склеивание арматуры с бетоном. Вторая группа количественно определяет факторы первой группы, не влияя при этом на сцепление. К ней относят класс и возраст бетона.

Напряженно-деформированное состояние (**НДС**) в зонах перераспределения напряжений весьма неоднозначно. Оно зависит от всех факторов в совокупности. Автор работы [4] установил, что НДС на участках действия касательных напряжений сцепления значительно изменяется под действием нагрузки [4].

Поскольку на сцепление оказывает влияние множество факторов, возникла необходимость в применении феноменологического подхода математического анализа опытных данных на основе упрощающих предпосылок.

Экспериментально определить значение величины сцепления $\tau_{сц}$ на участке перераспределения путем измерения нормальных напряжений в арматуре σ_s в зоне контакта довольно трудно [4 – 6]. Поэтому применение данной характеристики для оценки величины сцепления на участке контакта было ограничено.

В 1913 году Я. В. Столяров построил кривую, описывающую зависимость напряжений сцепления $\tau_{сц}$ от «деформаций скольжения» для стержня с переменным профилем [2]. Однако впервые о зависимости между напряжениями сцепления и взаимными смещениями арматуры относительно бетона заговорили ряд авторов еще в начале 40-х годов [2 – 4].

В результате испытаний М. М. Холмянский определил величину взаимных смещений арматуры относительно бетона [4]. Исследования заключались в наблюдении за смещением арматуры относительно бетона при передаче предварительных напряжений и выдергивании арматуры из призм, опирающихся торцом.

На основании проведенных работ Я. В. Столяров назвал выявленную зависимость законом сцепления [2].

Причиной повышенного внимания к вопросу сцепления в СССР в 1950 – 1960 гг. стало активное внедрение в строительство предварительно напряженных армированных конструкций. В целях поиска решения проблемы сцепления арматуры и бетона в данных конструкциях под руководством М. М. Холмянского и А. А. Оатула проведены фундаментальные экспериментально-теоретические исследования. Однако при интерпретации закона сцепления между арматурой и бетоном у Холмянского М. М. и Trost H. возникли значительные разногласия.

Было установлено, что при взаимодействии прядей стержня (для канатов) и бетона под нагрузкой арматуре свойственно винтовое движение в бетоне. В стадии предварительного обжатия наблюдаются значительные смещения до 1 мм. При этом величина смещений g является условной характеристикой, описывающей относительное сцепление профилированной арматуры под нагрузкой (рис. 1).

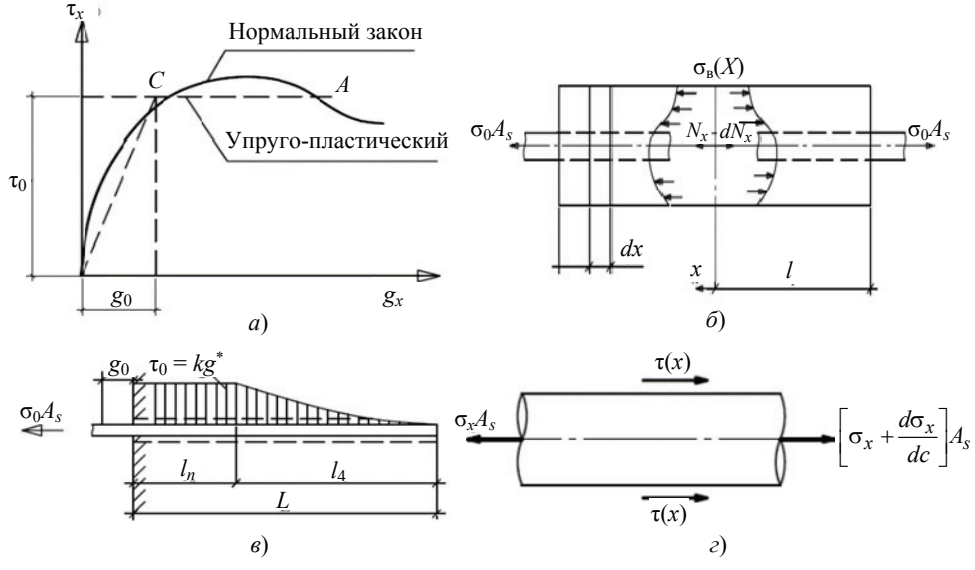


Рис. 1. Совместная работа арматурного стержня с бетоном:
а – диаграмма «τ – g»: упруго-пластический и нормальный законы сцепления; *б* – распределение напряжений сцепления по длине стержня при упруго-пластическом законе; *в* – расчет на сцепление и равновесие бетонного элемента; *г* – равновесие элемента *dx* стержня

Продольные усилия, возникающие в пряди, прижимают ее выступы к «бетонной гайке». При этом наблюдается взаимосвязь между трением от поперечного давления стержня о бетон в зоне контакта и периодическим профилем арматуры.

Феноменологический метод при определении касательных напряжений $\tau_{сц}$ имеет ряд недостатков:

– не учитываются стесненные деформации;

– невозможно определить НДС на участках контакта при образовании трещин и пластических деформаций;

– возможны деформации бетонной оболочки около арматурной области по всей длине анкеровки.

Вышеперечисленные недостатки возможно устранить с помощью моделей, основывающихся на положениях теорий ползучести и упругости.

Применение численных методов расчета и ЭВМ для моделирования сцепления позволит получить достоверные и подробные результаты без проведения трудоемких экспериментов.

Математическая модель сцепления арматуры с бетоном.

Современный аппарат механики деформируемого твердого тела позволяет решить данную задачу с учетом нелинейности работы материала на основе методов конечных элементов (**МКЭ**). На данный момент МКЭ получил широкое применение в инженерной практике, что способствовало разработке и совершенствованию таких программных комплексов как ANSYS, Abaqus и др. [7, 8].

В данной работе численное решение задачи сцепления арматуры с бетоном выполнялось на базе комплекса ANSYS 19.0 Workbench (рис. 2).

В качестве модели бетона принята модель Menetrey–Willam, основанная на поверхности пластичности Willam–Warnke, включающей зависимость от трех независимых инвариантов тензора напряжений [7 – 14].

Поверхность пластичности Willam–Warnke отличается от поверхности Мора–Кулона тем, что она не имеет острых краев, которые могли бы вызвать некоторые трудности в решении данной задачи.

Для описания работы стеклопластикового стержня (*далее* **СПА**) использован закон Гука для ортотропного материала, а для описания работы стальной арматуры принята билинейная изотропная модель.

Второстепенным фактором сцепления арматуры с бетоном является сцепление [11 – 13]. Для моделирования данного процесса применялась модель связанной зоны (*англ.* Cohesive zone model (**CZM)**), в которой разрушение матрицы связующего рассматривается как постепенное отделение поверхности профиля арматуры от основного стержня с последующим расслоением [13].

В работе применяется модель соединения и разрушения контакта соединения 2-го вида, а именно сдвига. Расслоение вдоль контактной поверхности арматуры, а в данном случае «стержень – бетон», обладает существенным значением для несущей способности сцепления стержня с бетоном.

На рисунке 3 показан график модели билинейного поведения профиля арматуры со стержнем [13]

$$\sigma_n = K_n u_n (1 - d_n), \qquad (1)$$

где σ_n – напряжение; K_n – контактная жесткость; u_n – смещение по касательной в контактной области; d_n – параметр нарушения связывающей матрицы.

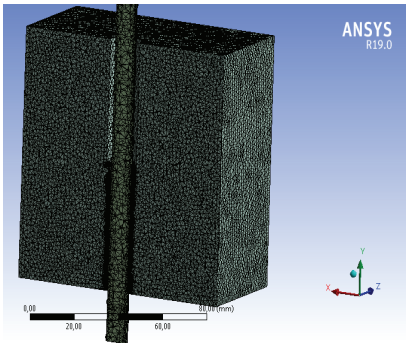


Рис. 2. Расчетная конечная элементная модель

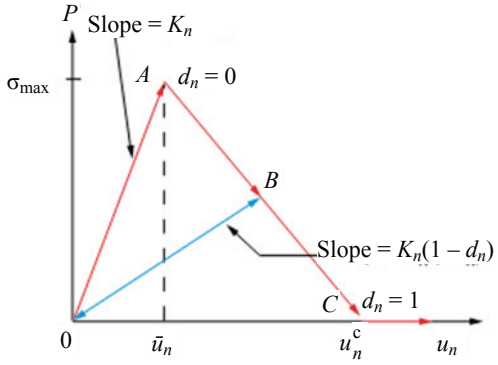


Рис. 3. Модель билинейного поведения цементного геля в зоне контакта арматуры с бетоном [13]

Параметр нарушения склеивающей матрицы

$$d_n = \left(\frac{u_n - \overline{u_n}}{u_n}\right)\left(\frac{u_n^c}{u_n^c - \overline{u_n}}\right), \tag{2}$$

где $\overline{u_n}$, u_n^c – смещение (длина скольжения) в контактной зоне при максимальном напряжении и разрушении склеивающей матрицы соответственно.

При этом энергия критического разрушения вычисляется по формуле

$$G_{cn} = \frac{1}{2}\sigma_{max} u_n^c, \tag{3}$$

где σ_{max} – максимальное контактное напряжение.

Для расчета требуются ориентировочные данные экспериментальных исследований, а именно должны быть заданы $\overline{u_n}$, u_n^c и K_n. Для этого приведем серию из 100 численных экспериментов в пакете ANSYS optiSLang [7], в котором искомые параметры будут заданы в диапазоне случайным образом (табл. 1), где $\sigma_{нн}$ – начальные напряжения (**НН**).

Предположим, что функция принимает вид $y = f(X, p_1, \ldots, p_n)$. Приведем ее к виду $y = f(X, p)$, где X – вектор входных данных, формирующих модель (в данном случае смещение арматурного стержня относительно бетона от прикладываемой нагрузки), p – вектор параметров из табл. 1.

Отметим, что язык реализуемого в ANSYS optiSLang пакета отличается от кода на MATLABV.R2014a. По содержанию программы существенно разные. Код на MATLABV.R2014a проводит вычисление значения среднеквадратичной ошибки MSE.

Таблица 1

Диапазон предлагаемых величин искомых параметров*

Значения	σ_{max}, МПа	K_n	$\overline{u_n}$, мк	u_n^c, мк	$\sigma_{нн}$, МПа
min	0				
max	3,2	20	25	50	3

*Данные значения получены авторами [1 – 6]

Проведем поиск среднеквадратичной ошибки

$$\mathrm{MSE} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left(z_i - \overline{z_1}\right)^2, \tag{4}$$

где m – объем выборки; z_i – i-й элемент выборки; $\overline{z_1}$ – среднее арифметическое значение выборки.

В то же время ANSYS optiSLang не проводит никаких вычислений MSE, а формирует поток данных по изменению модели в ANSYS, из которых получается величина смещения арматурного стрежня относительно бетона. Вследствие этого необходимо работать в двух отдельных пакетах, так как расчет проводится параллельно, и приходится переносить данные с одного пакета в другой (то есть передавать массивы данных предлагаемых величин параметров MATLABV.R2014a для дальнейшего вычисления в ANSYS, а результат переносим обратно MATLABV.R2014a для поиска MSE). При передаче тензоров в MATLABV.R2014a формируется подгруппа потока данных в виде матрицы.

Как и в одномерном случае, характер задачи и, соответственно, возможные методы решения существенно зависят от информации о целевой функции, которая нам доступна в процессе ее исследования. В данном случае целевая функция задается аналитической формулой, являясь при этом дифференцируемой. Следовательно, можно вычислить ее частные производные, получить явное выражение для градиента, определяющего в каждой точке направления возрастания и убывания функции, и использовать данную информацию для решения задачи.

В других случаях никакой формулы для целевой функции нет, а имеется лишь возможность определить ее значение в любой точке рассматриваемой области (в нашем случае в результате эксперимента), что существенно помогает при выборе метода оптимизации начальной точки поиска. Целевая функция рассматриваемой области значений обладает рядом специальных свойств, что затрудняет анализ. Конкретизация задачи, выделение определенных классов функций и областей позволяют провести более глубокое исследование и разработать методы, которые решают задачу исчерпывающим образом. Важным классом таких «специализированных» задач оптимизации являются задачи линейного программирования.

Сплошной перебор.

Данный метод используется для решения одномерных задач, иногда двумерных, реже трехмерных. Однако, для задач большей размерности он практически непригоден, поскольку требует больших затрат времени, необходимых для проведения расчетов. Предположим, что целевая функция зависит от n переменных, а область определения является n-мерным кубом, каждую сторону которого при построении сетки делим на 40 частей. Тогда общее число узлов сетки будет равно $41n$. Пусть вычисление значения функции в одной точке требует 1000 арифметических операций (это недостаточно для функции пяти переменных). В таком случае, общее число операций составит 1011. Если в нашем распоряжении имеется ЭВМ с быстротой обработки действий миллион операций в секунду, то для решения задачи с помощью данного метода потребуется 10^6 секунд, что превышает 11 суток непрерывной работы. Добавление еще одной независимой переменной увеличит это время в 40 раз.

Проведенная оценка показывает, что для больших задач поиска метод сплошного перебора непригоден. В некоторых случаях сплошной перебор заменяют случайным поиском. Тогда точки сетки просматриваются не подряд, а в случайном порядке. В результате поиск наименьшего значения целевой функции существенно ускоряется, но теряет свою надежность.

Градиентный спуск.

Выберем каким-либо способом начальную точку, вычислим в ней градиент рассматриваемой функции и сделаем небольшой шаг в обратном, антиградиентном направлении.

Шаг градиентного спуска принимает следующий вид:

$$p^{(n+1)} = p^{(n)} - \alpha \nabla_p \text{loss}(p), \tag{5}$$

где $p^{(n)}$ – значение вектора параметров на текущем шаге; α – шаг обучения; $\nabla_p \text{loss}(p) = \left[\frac{df}{dx_1} \dots \frac{df}{dx_n}\right]^{\text{T}}$ – градиент функции потерь по вектору параметров. Фактически, для решения поставленной задачи требуется выполнение условия $\nabla_p \text{loss}(p) = 0$.

В результате, придем в точку, в которой значение функции будет меньше первоначального. В новой точке повторим процедуру: снова вычислим градиент функции и сделаем шаг в обратном направлении. Продолжая данный процесс, будем двигаться в сторону убывания функции. Специальный выбор направления движения на каждом шаге позволяет надеяться на то, что в данном случае приближение к наименьшему значению функции будет более быстрым.

Алгоритм Ньютона.

Шаг алгоритма Ньютона принимает вид

$$p^{(n+1)} = p^{(n)} - \left[\text{Hloss}(p)\right]^{-1} \nabla_p \text{loss}(p), \tag{6}$$

где $\text{Hloss}(p) = \begin{bmatrix} \frac{d^2\text{loss}(p)}{dx_1^2} & \frac{d^2\text{loss}(p)}{dx_1 dx_2} & \cdots & \frac{d^2\text{loss}(p)}{dx_1 d_n} \\ \frac{d^2\text{loss}(p)}{dx_2 dx_1} & \frac{d^2\text{loss}(p)}{dx_2} & \cdots & \frac{d^2\text{loss}(p)}{dx_2 dn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d^2\text{loss}(p)}{dx_n dx_1} & \frac{d^2\text{loss}(p)}{dx_n dx_2} & \cdots & \frac{d^2\text{loss}(p)}{dx_n^2} \end{bmatrix}$. (7)

Оптимизируем алгоритмом Гаусса–Ньютона.

Чтобы не путаться во множестве символов, будем считать, что J_r – матрица Якоби функции невязок в текущей точке p:

$$J_r = \begin{bmatrix} \frac{dr_1}{dp_1} & \cdots & \frac{dr_1}{dp_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dr_m}{dp_1} & \cdots & \frac{dr_m}{dp_n} \end{bmatrix}. \tag{8}$$

Тогда алгоритм Гаусса–Ньютона можно записать в виде

$$p^{(n+1)} = p^{(n)} - \left[J_r^{\text{T}} J_r\right]^{-1} J_r^{\text{T}} r(p). \tag{9}$$

Запись по форме полностью совпадает с записью метода Ньютона. Только вместо матрицы Гессе используется $J_r^{\text{T}} J_r$, а вместо градиента – $J_r^{\text{T}} r(p)$.

Из вышеизложенных экспериментов получили m точек X. Векторная функция невязок зависит только от вектора параметров: $r(p) = (r_1(p) \dots r_m(p))$, где $r_k(p) = y_k - f(X, p)$. Возникает вопрос: «Почему функция невязок зависит только от p, ведь в ней присутствует X?». Дело в том, что X установлен из численных экспериментов и зафиксирован, и только вектор параметров p является переменным.

Необходимо установить значения вектора параметров p, чтобы сумма квадратов невязок была минимальная. Вместо привычной MSE будем использовать среднеквадратичную невязку SSE, чтобы не проводить везде деление на m. Данные функции достигают своего минимума на одном и том же векторе параметров. Функция потерь имеет вид

$$\operatorname{loss}(p) = r_1^2(p) + \dots + r_m^2(p) = \sum_{k=1}^{m} r_k^2(p). \tag{10}$$

Чтобы воспользоваться методом Ньютона, нужен градиент данной функции и матрица Гессе. Градиент – это вектор частных производных; производная суммы – сумма производных, а производная квадрата функции r_1^2 равна $2r\dfrac{dr}{dp}$.

Таким образом, получаем

$$\nabla_p \operatorname{loss}(p) = \left(\sum_{k=1}^{m} \frac{dr_k}{dp_1}, \dots, \sum_{k=1}^{m} 2r\frac{dr_k}{dp_n} \right). \tag{11}$$

Матрица Гессе состоит из всех комбинаций вторых производных. Ячейка матрицы Гессе принимает вид

$$\left[\operatorname{Hloss}(p)\right]_{ij} = \frac{d^2 \operatorname{loss}}{dp_i dp_j} = \sum_{k=1}^{m} \left(2r\frac{dr_k dr_k}{dp_i dp_j} + 2r\frac{d^2 r_k}{dp_i dp_j} \right). \tag{12}$$

Заметим, что в формуле для матрицы Гессе есть часть $2r\dfrac{dr_k dr_k}{dp_i dp_j}$, которая уменьшается по мере приближения к минимуму. Чем ближе к минимуму, тем меньше невязка, и тем меньше r_k, а следовательно и все произведение. Именно данный компонент требует вычислительных мощностей из-за содержания второй производной. Однако если им пренебречь, то получим алгоритм Гаусса–Ньютона.

Отметим, что матрица Якоби гораздо проще, чем градиент и матрица Гессе $2J_r^{\mathrm{T}} J_r \approx \operatorname{Hloss}(p)$, что наглядно видно при проведении матричного умножения (строка умножается на столбец). Для матрицы Гессе без компонента получается результат, равный $2r\dfrac{d^2 r_k}{dp_i dp_j}$, которым предлагаем пренебречь.

В то же время градиент необходимо умножить на матрицу-вектор

$$2J_r^{\mathrm{T}} r \approx \nabla_p \operatorname{loss}(p). \tag{13}$$

Таким образом, получается, что алгоритм Гаусса–Ньютона – это метод Ньютона с аппроксимацией матрицы Гессе через матрицу Якоби, который работает только с MSE.

Из вышеизложенного можно предположить, что градиентный спуск и метод Гаусса–Ньютона можно скомбинировать и привести к общему виду

$$p^{(n+1)} = p^{(n)} - \left[J_r^{\mathrm{T}} J_r + \gamma I \right]^{-1} J_r^{\mathrm{T}} r(p). \tag{14}$$

Скалярная переменная γ умножается на диагональную единичную матрицу I размерности n (количество параметров). Если значение γ приравнивается к нулю, то шаг принимается как шаг Гаусса–Ньютона. Но если значение принимает большую величину, то получается градиентный спуск, то есть метод колеблется между градиентным спуском и алгоритмом Гаусса–Ньютона.

Фактически, после каждого удачного шага оптимизации γ уменьшается, а после каждой неудачи увеличивается. Еще одна особенность предложенного метода – проводятся только шаги, которые действительно уменьшают значение MSE. Следует отметить, что при неудачном шаге происходит пересчет матрицы Якоби, что неэффективно, то есть, при больших значениях можно ею пренебречь, а проводить только градиентный спуск.

Результаты поиска параметров модели численным методом.

Разработанная физическая модель описывает сцепления арматуры с бетоном с уточненной функцией НН и склеивающего цементного геля при различных циклах замораживания-оттаивания (в диапазоне F0 – F100). Численные и натурные эксперименты имеют высокую сходимость (рис. 4). Статистический анализ, основанный на значениях средней абсолютной ошибки MAPE, MSE и других, также показал, что предлагаемая физическая модель имеет низкий показатель ошибки. Поэтому данные, полученные из модели, достоверны. На их основе можно провести анализ поведения начального напряжения и склеивающего цементного геля под воздействием циклов замораживания-оттаивания.

Для описания работы цементного геля в контактной области арматуры с бетоном применялась модель CZM, имеющая билинейную форму. Модель CZM можно описать четырьмя параметрами, для поисков которых применялся численный метод.

С помощью численного метода получена зависимость изменения $\sigma_{нн}$ от прикладываемой нагрузки $\tau_{сц}$ (рис. 5). Следует отметить, что величины $\sigma_{нн}$ для СПА и металлической арматуры оказались схожими.

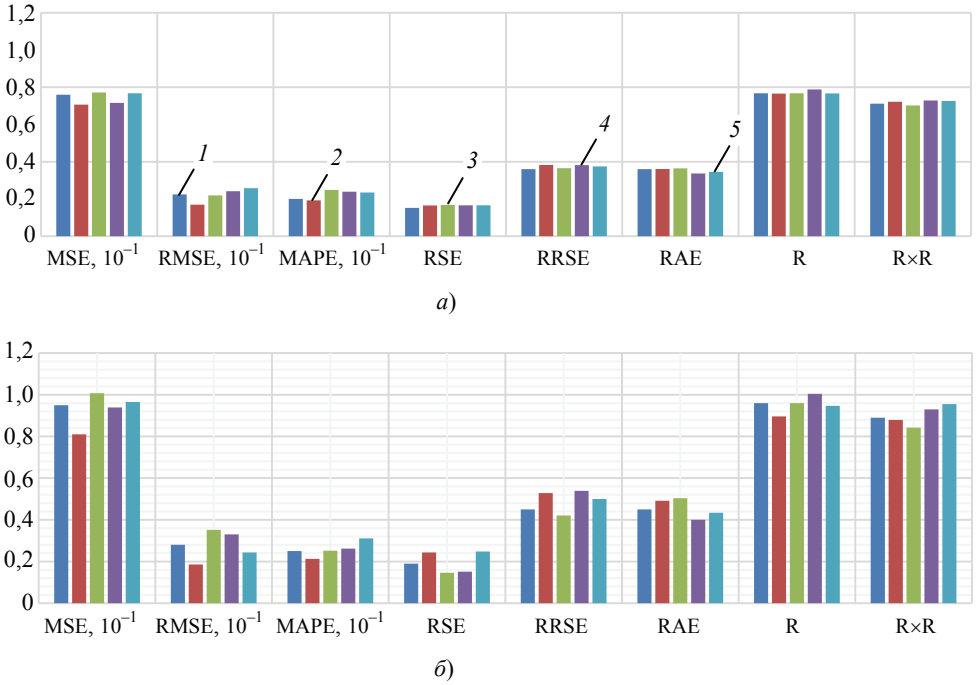


Рис. 4. Статистические параметры предлагаемой модели для образцов со СПА (*а*) и металлической арматурой (*б*):
1 – F0; *2* – F25; *3* – F50; *4* – F75; *5* – F100

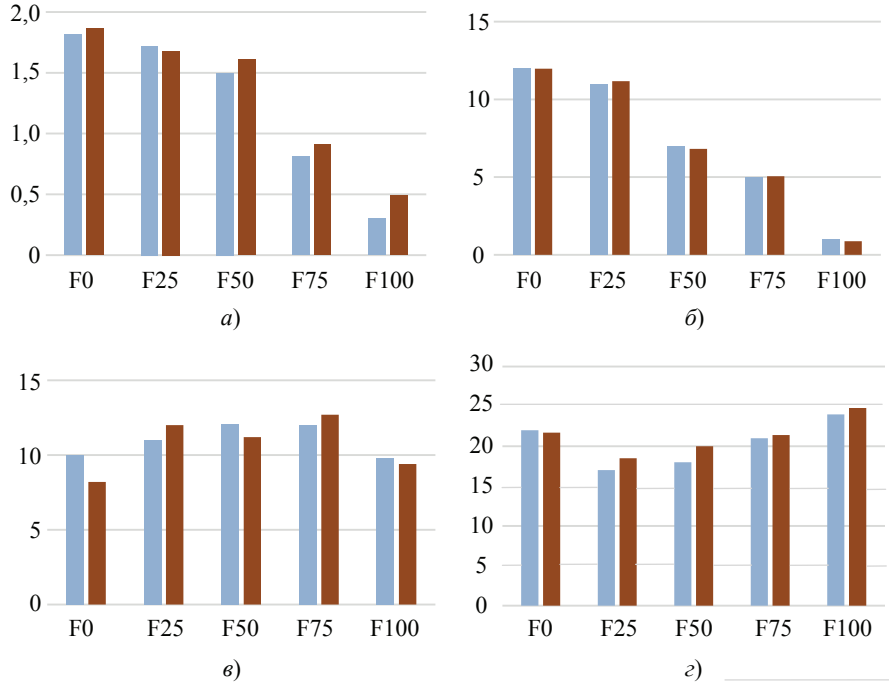


Рис. 5. Параметры CZM, описывающие поведение цементного геля в области заделки арматуры в бетон:

а – σ_{max} – максимальное допустимое напряжение цементного геля; *б* – K_n – контактная жесткость; *в* – $\overline{u_n}$ – смещение (длина скольжения) в контактной зоне при максимальном напряжении; *г* – u_n^c – смещение в контактной зоне при разрушении склеивающей матрицы;

■ – СПА; ■ – металлическая арматура

В бетоне, кроме тех внутренних напряжений, которые образованы внешней нагрузкой и уравновешивают ее, могут быть и другие самоуравновешивающиеся внутренние напряжения, которые, как правило, образуются в процессе изготовления элемента и называются начальными. В данном случае их величина составляет 0,5…0,7 от разрушающего напряжения (рис. 6). С увеличением прикладываемого усилия к арматурному стержню, НН начинают уменьшаться и при $\tau_{сц} \approx 8$ МПа достигают нулевых значений. При рассмотрении данного процесса уже после

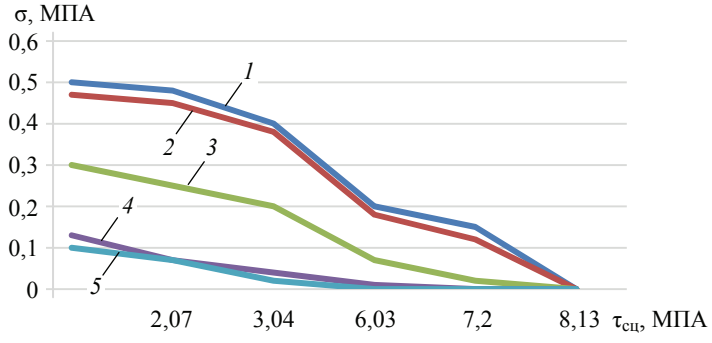


Рис. 6. Зависимости «начальные напряжения – напряжение $\tau_{сц}$» при различных циклах замораживания–оттаивания:

1 – F0; *2* – F25; *3* – F50; *4* – F75; *5* – F100

циклов замораживания-оттаивания (до F25) видно, что НН практически не изменяются. При последующих циклах напряжения начинают снижаться и при F75 достигают минимальных значений, которые практически не оказывают влияния на величину Δ, однако следует отметить, что при F100 величина напряжений все же присутствует, но ее влияние незначительно ($\sigma \approx 0{,}1$ МПа). При $\tau_{сц} \geq 3$ МПа напряжения отсутствуют.

Применение данного численного метода для анализа физических процессов, возникающих при сцеплении арматуры с бетонном (таких, как склеивающий цементный гель и начальные напряжения, которые невозможно установить эмпирическими методами), показало высокую эффективность. Сопоставление данных, полученных эмпирическим и численным экспериментами, показывает высокую сходимость полученных результатов.

Выводы

1. Начальные напряжения и склеивающий цементный гель оказывают влияние на величину смещения Δ в тех случаях, когда нагрузка, прикладываемая к арматуре, не превышает 0,4 от разрушающей нагрузки для металлической арматуры и 0,55 – для СПА.

2. С увеличением циклов замораживания-оттаивания влияние начальных напряжений и склеивающего цементного геля на величину сцепления уменьшается. При величине циклов более F100 их влияние практически отсутствует.

Список литературы

1. Залигер, Р. Железобетон, его расчет и проектирование / Р. Залигер ; пер. с нем. Л. В. Рейнберга, Н. Н. Чечулина ; под ред. П. Я. Каменцева. – М. – Л. : Гос. изд-во, 1928. – 671 с.

2. Столяров, Я. В. Введение в теорию железобетона / Я. В. Столяров. – М. – Л. : Стройиздат наркомстроя, 1941. – 447 с.

3. Гараи, Т. Исследование анкеровки арматуры в бетоне : дис. … канд. техн. наук : / Гараи Тамаш. – М., 1953. – 161 с.

4. Холмянский, М. М. Контакт арматуры с бетоном / М. М. Холмянский. – М. : Стройиздат, 1981. – 184 с.

5. Мурашев, В. И. Трещиноустойчивость, жесткость и прочность железобетона / В. И. Мурашев. – М. : Машстройиздат, 1950. – 268 с.

6. Тевелев, Ю. А. Железобетонные конструкции в водохозяйственном строительстве: проектирование и изготовление / Ю. А. Тевелев, А. Н. Дмитриев. – М. : Росинформагротех, 2006. – 312 с.

7. Экспериментальные исследования прочности сцепления стеклопластиковой арматуры с цементно-песчаным бетоном / А. Н. Николюкин, В. П. Ярцев, И. И. Коломникова, Д. З. Альджабуби // Транспортные сооружения : интернет-журнал. – 2019. – Т. 6, № 1. – 11 с. – URL : https://elibrary.ru/download/elibrary_38097381_81840646.pdf (дата обращения: 30.06.2020).

8. Анализ напряжено-деформированного состояния бетона и арматуры в области их зацепления в программном комплексе ANSYS / А. Н. Николюкин, В. П. Ярцев, С. А. Мамонтов [и др.] // Вестн. Белгородского гос. технолог. ун-та им. В. Г. Шухова. – 2019. – № 11. – С. 43 – 52. doi: 10.34031/2071-7318-2019-4-11-43-52

9. ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. Release 15.0. – Canonsburg, Pennsylvania, USA, 2013. – 1448 p.

10. Drucker, D. C. Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design / D. C. Drucker, W. Prager // Quarterly of Applied Mathematics. – 1952. – Vol. 10, No. 2. – P. 157 – 165.

11. Menetrey, P. Numerical Analysis of Punching Failure in Reinforced Concrete Structures : Dis. … Doctor of Technical Sciences / P. Menetrey. – Lausanne, 1994. – 197 p.

12. Willam, K. J. Constitutive Models for the Triaxial Behavior of Concrete / K. J. Willam, E. P. Warnke // Colloquium on Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses : Proceedings of the International Association for Bridge and Structural Engineering, 17 – 19 May, 1974, Bergamo, Italy. – ETH Zurich, 1975. – Vol. 19. – P. 1 – 30.

13. Кашеварова, Г. Г. Расчетно-экспериментальное исследование процесса разрушения связей сцепления при вдавливании стержня жесткой арматуры в бетон / Г. Г. Кашеварова, А. С. Мартиросян, В. И. Травуш // Вестн. Пермского национ. исследоват. политехн. ун-та. Механика. – 2016. – № 3. – С. 62 – 75. doi: 10.15593/perm.mech/2016.3.04

14. Гиздатуллин, А. Р. Совместная работа полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном в конструкциях : дис. … канд. техн. наук : 05.23.05 / Гиздатуллин Антон Ринатович. – Казань, 2018. – 190 с.

The Analytical Study of the Value of Adhesion of Cement Gel between Reinforcement and Concrete

A. N. Nikolyukin, V. P. Yartsev, S. A. Mamontov, I. I. Kolomnikova, A. S. Pechnikov, N. O. Nikitin

Department of Designing of Buildings and Structures, valax1@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: fittings; concrete; mathematical model; clutch; numerical method.

Abstract: Disruption of the adhesion of reinforcement to concrete causes significant deformation of the structure, which can subsequently lead to the loss of its bearing capacity. There is a need to study the bonding process between concrete and reinforcement under various influences. The results of a numerical experiment on pulling out reinforcement of periodic profile from concrete are presented. A mathematical model to study the processes taking place in the field of embedding reinforcement in concrete has been built. The results of numerical modeling are described.

References

1. Zaliger R., Kamentsev P.Ya. [Ed.] *Zhelezobeton, yego raschet i proyektirovaniye* [Reinforced concrete, its calculation and design], Moscow - Leningrad: Gosudarstvennoye izdatel'stvo, 1928, 671 p. (In Russ.)

2. Stolyarov Ya.V. *Vvedeniye v teoriyu zhelezobetona* [Introduction to the theory of reinforced concrete], Moscow - Leningrad: Stroyizdat narkomstroya, 1941, 447 p. (In Russ.)

3. Garai T. *PhD Dissertation* (*Technical*), Moscow, 1953, 161 p. (In Russ.)

4. Kholmyanskiy M.M. *Kontakt armatury s betonom* [Contact of reinforcement with concrete], Moscow: Stroyizdat, 1981, 184 p. (In Russ.)

5. Murashev V.I. *Treshchinoustoychivost', zhestkost' i prochnost' zhelezobetona* [Crack resistance, stiffness and strength of reinforced concrete], Moscow: Mashstroyizdat, 1950, 268 p. (In Russ.)

6. Tevelev Yu.A., Dmitriyev A.N. *Zhelezobetonnyye konstruktsii v vodokhozyaystvennom stroitel'stve: proyektirovaniye i izgotovleniye* [Reinforced concrete structures in water management: design and manufacture], Moscow: Rosinformagrotekh, 2006, 312 p. (In Russ.)

7. https://elibrary.ru/download/elibrary_38097381_81840646.pdf (accessed 30 June 2020).

8. Nikolyukin A.N., Yartsev V.P., Mamontov S.A., Kolomnikova I.I., Al Ward A.M. [Analysis of the stress-strain state of concrete and reinforcement in the area of their engagement in the ANSYS software package], *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova* [Bulletin of the Belgorod State Technological Logical University named after V. G. Shukhov], 2019, no. 11, pp. 43-52, doi: 10.34031/2071-7318-2019-4-11-43-52 (In Russ., abstract in Eng.)

9. *ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. Release 15.0*, Canonsburg, Pennsylvania, USA, 2013, 1448 p.

10. Drucker D.C., Prager W. Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design, *Quarterly of Applied Mathematics*, 1952, vol. 10, no. 2, pp. 157-165.

11. Menetrey P. *PhD Dissertation* (*Technical*), Lausanne, 1994, 197 p.

12. Willam K.J., Warnke E.P. *Colloquium on Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses*, Proceedings of the International Association for Bridge and Structural Engi-neering, 17 - 19 May, 1974, Bergamo, Italy, ETH Zurich, 1975, vol. 19, pp. 1-30.

13. Kashevarova G.G., Martirosyan A.S., Travush V.I. [Computational and experimental study of the process of destruction of bonds of adhesion when a rigid reinforcement bar is pressed into concrete], *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [Bulletin of the Perm national Research Polytechnic University. Mechanics], 2016, no. 3, pp. 62-75, doi: 10.15593/perm.mech/2016.3.04 (In Russ., abstract in Eng.)

14. Gizdatullin A.R. *PhD Dissertation* (*Technical*), Kazan, 2018, 190 p. (In Russ.)

Analytische Untersuchung des Wertes der Haftung von Zementgel zwischen Bewehrung und Beton

Zusammenfassung: Die Störung der Haftung der Bewehrung mit dem Beton verursacht signifikante Verformungen der Struktur, die anschließend zu einem Verlust der Tragfähigkeit führen können. Es besteht die Notwendigkeit, den Prozess der Haftung zwischen Beton und Bewehrung unter verschiedenen Einflüssen zu untersuchen. Es sind die Ergebnisse des numerischen Experiments zur Erprobung des Herausziehens der Bewehrung des periodischen Profils aus Beton präsentiert. Es ist ein mathematisches Modell erstellt, mit dem die Prozesse im Bereich der Einbettung von Bewehrung in Beton untersucht werden können. Die Ergebnisse der numerischen Modellierung sind betrachtet.

Étude analytique de l'adhérence du gel de ciment entre l'armature et le béton

Résumé: La rupture de l'adhérence de l'armature avec le béton provoque des déformations importantes de la structure, ce qui peut ensuite entraîner une perte de sa capacité portante. Il est nécessaire d'étudier le processus d'adhérence entre le béton et les armatures sous diverses influences. Sont présentés les résultats de l'expérience numérique du test sur la rupture d'armature du profil périodique du béton. Est construit un modèle mathématique permettant d'étudier les processus qui se déroulent dans le domaine de l'étanchéité des armatures dans le béton. Sont examinés les résultats de la simulation numérique.

Авторы: ***Николюкин Алексей Николаевич*** – аспирант кафедры «Конструкции зданий и сооружений»; ***Ярцев Виктор Петрович*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкции зданий и сооружений»; ***Мамонтов Семен Александрович*** - старший преподаватель кафедры «Конструкции зданий и сооружений»; ***Коломникова Ирина Игоревна*** – студент; ***Печников Александр Сергеевич*** – магистрант; ***Никитин Никита Олегович*** – магистрант**,** ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: ***Леденев Виктор Васильевич*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкции зданий и сооружений», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Савенков Александр Петрович

Savenkov Aleksandr

Доцент кафедры «Мехатроника и технологические измерения» ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов.

13 декабря 2018 года на заседании диссертационного совета Д212.260.01 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Развитие теории бесконтактных аэродинамических измерений физических свойств жидкостей» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

Работа выполнена на кафедре «Мехатроника и технологические измерения» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Научный консультант – доктор технических наук, профессор М. М. Мордасов.

В диссертации исследованы бесконтактные аэродинамические методы измерений вязкости и поверхностного натяжения, основанные на деформации поверхности контролируемой жидкости газовой струей. Цель работы заключалась в повышении точности аэродинамических методов за счет снижения чувствительности измерительных устройств к влияющим величинам. Исследования проведены с использованием результатов экспериментов и оригинального математического описания динамического взаимодействия струи газа с поверхностью вязкой жидкости, составляющего основу научной новизны работы. В результате сопоставительного анализа бесконтактных методов установлено, что наиболее перспективными из них являются: метод измерений поверхностного натяжения с определением степени деформации поверхности жидкости по ее фокусному расстоянию и импульсный метод измерений вязкости с неперпендикулярным аэродинамическим воздействием. Разработанные устройства рекомендованы к внедрению на предприятиях химической и пищевой промышленности.

Решением ВАК Минобрнауки РФ от 7 мая 2019 года № 415/нк-9 Савенкову А. П. присуждена ученая степень доктора технических наук.

Область научных исследований: бесконтактные аэрогидродинамические методы измерений вязкости и поверхностного натяжения жидкостей, взаимодействие струи газа с поверхностью жидкости, триангуляционные детекторы расстояния.

Балобаева Нина Николаевна

Инженер-технолог ФГБНУ «ВНИИТиН», г. Тамбов.

18 марта 2020 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.02 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитила диссертацию на тему «Совершенствование процессов термокаталитической деструкциии изомеризации жидких углеводородов» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий.

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент К. В. Брянкин.

Работа выполнена на кафедре «Химия и химические технологии» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: кинетика и аппаратурное оформление процессов деструкции углеводородного сырья.

Буланова Валентина Олеговна

Аспирант кафедры «Мехатроника и технологические измерения» ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов.

09 июля 2020 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.01 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитила диссертацию на тему «Разработка метода линейного импульсного источника теплоты для определения теплофизических свойств твердых материалов» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор С. В. Пономарев.

Работа выполнена на кафедре «Мехатроника и технологические измерения» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: разработка методов и средств контроля теплофизических характеристик теплоизоляционных материалов.

Коновалов Дмитрий Николаевич

Соискатель кафедры «Механика и инженерная графика» ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов.

17 декабря 2019 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.06 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Совершенствование электрохимического мембранного метода разделения технологических растворов и сточных вод, содержащих ионы NH_4^+, Zn^{2+}, NO_3^-, SO_4^{2-}, PO_4^{3-}» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.03 – Технология электрохимических процессов и защита от коррозии.

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент С. В. Ковалев.

Работа выполнена в Научно-образовательном центре «Безотходные и малоотходные технологии» и на кафедре «Механика и инженерная графика» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: процессы электромембранного разделения растворов.

Корнилов Кирилл Сергеевич

Инженер управления фундаментальных и прикладных исследований, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов.

30 января 2020 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.07 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Модели и алгоритмы поддержки принятия решений при определении параметров систем нагрева прессового оборудования» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (информационные технологии).

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор С. В. Карпушкин.

Работа выполнена на кафедре «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: автоматизированное проектирование технологического оборудования.

Чечетов Кирилл Евгеньевич

Соискатель кафедры «Мехатроника и технологические измерения» ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов.

09 июля 2020 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.01 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Аэродинамический метод измерений поверхностного натяжения жидкостей» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент А. П. Савенков.

Работа выполнена на кафедре «Мехатроника и технологические измерения» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: аэродинамические методы измерений, бесконтактные измерения, взаимодействие струи газа с поверхностью жидкости, поверхностное натяжение, силовое действие газовых струй.