

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***

2019. Том 25. № 1.

**Четырехязычный
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**

СОДЕРЖАНИЕ

Автоматика. Информатика.	
Управление. Приборы	6
Тихомиров С. Г., Подвальный С. Л., Попов А. П., Неизвестный О. Г. Синтез структуры прогнозирующей модели системы управления реактором дегидрирования этилбензола	6
Алехин П. А., Глебов А. О., Карпов С. В., Карпушкин С. В., Хлебников В. А. Разработка алгоритма отображения результатов топологической оптимизации при решении двумерных задач стационарной теплопроводности	22
Тимофеев А. М. Влияние времени однофотонной передачи информации на вероятность ошибочной регистрации данных асинхронных квантово-криптографических каналов связи	36
Рогачёв А. И., Сустин А. И., Панасюк Ю. Н., Пудовкин А. П., Данилов С. Н. Применение калмановской фильтрации для метода динамических весовых коэффициентов в третичной обработке информации	47
Саиф М. Н. М., Матвейкин В. Г., Дмитриевский Б. С., Башкатова А. В., Мамонтов А. А. Математические модели многосвязных объектов управления	53
Авцинов И. А., Емельянов А. Е., Ивлиев М. Н. Исследование влияния буферизации данных на качество управления в сетевых системах ...	63
Пономарев С. В., Мищенко С. В., Мищенко Е. С., Аль-Бусиди С. С. С. Оценка индикатора возможности улучшения и выполнения мероприятий по повышению результативности и эффективности процессов системы менеджмента качества в образовательной организации ...	72
Процессы и аппараты химических и других производств. Химия	86
Промтов М. А., Степанов А. Ю. Интенсификация процесса экстрагирования в роторном импульсном аппарате с профилированным ротором	86
Капранова А. Б., Верлока И. И., Яковлев П. А., Бахаева Д. Д. О влиянии комплексного параметра гравитационного аппарата на качество смеси после первой стадии смешивания	92
Севостьянов М. В., Осокин А. В. Аналитические исследования процесса формования вязко-пластичного материала в фильерах плоско-матричного гранулятора	98
Туголуков Е. Н., Алексеев С. Ю., Дьячкова Т. П., Буракова Е. А., Еззеддин Б. Энергосбережение в системах вентиляции помещений	108
Образцова Е. Ю., Дегтярев А. А., Рухов А. В., Бакунин Е. С. Физико-химические особенности коллоидной устойчивости в полярных растворителях оксида наногرافита, синтезированного электрохимическим способом	116

CONTENTS

Automation. Information Technology.	
Control. Instruments	6
Tikhomirov S. G., Podvalnyy S. L., Popov A. P., Neizvestnyy O. G. Synthesis of the Structure of a Predictive Model of Control System for Ethylbenzene Dehydrogenation Reactor	6
Alekhin P. A., Glebov A. O., Karpov S. V., Karpushkin S. V., Khlebnikov V. A. Development of an Algorithm for Displaying the Topological Optimization Results in Two-Dimensional Problems of Stationary Heat Conduction	22
Timofeev A. M. The Effect of Single Photon Transmission Time on the Probability of Erroneous Registration of Asynchronous Data of Quantum Cryptographic Communication Channels.....	36
Rogachev A. I., Sustin A. I., Panasyuk Yu. N., Pudovkin A. P., Danilov S. N. Application of Kalman Filtering for the Method of Dynamic Weights in Tertiary Information Processing.....	47
Saif M. N. M., Matveykin V. G., Dmitrievsky B. S., Bashkatova A. V., Mamontov A. A. Mathematical Models of Multiply-Connected Control Objects.....	53
Avtsinov I. A., Emelyanov A. E., Ivliev M. N. Investigating the Effect of Data Buffering on the Quality of Network Control Systems.....	63
Ponomarev S. V., Mishchenko S. V., Mishchenko E. S., Al-Busaidi S. S. S. Assessing the Indicator for Improvement Possibility of the Effectiveness and Efficiency of the Quality Management System in an Educational Organization	72
Chemical and Related Engineering.	
Chemistry	86
Promptov M. A., Stepanov A. Yu. Intensification of the Extraction Process in the Rotary Pulse Device with a Profiled Rotor.....	86
Kapranova A. B., Verloka I. I., Yakovlev P. A., Bakhaeva D. D. On the Influence of a Complex Parameter of the Gravitational Apparatus on the Quality of the Mixture after the First Stage of Mixing	92
Sevostyanov M. V., Osokin A. V. Analytical Studies of the Process of Molding a Viscous-Plastic Material in the Spinnerets of a Flat-Matrix Granulator.....	98
Tugolukov E. N., Alekseev S. Yu., Dyachkova T. P., Burakova E. A., Ezzeddin B. Energy Saving in Ventilation Systems of Rooms.....	108
Obraztsova E. Yu., Degtyarev A. A., Rukhov A. V., Bakunin E. S. Physical and Chemical of Properties Colloidal Stability in Polar Solvents of Nanographite Oxide Synthesized by Electrochemical Method	116

Машиностроение. Металлообработка	123
Ванин В. А., Колодин А. Н., Родина А. А., Фидаров В. Х. Построение формообразующих цепей станков со сложными движениями формообразования на основе гидравлических синхронных связей	123
Материаловедение. Нанотехнологии	136
Мордасов Д. М., Макеев П. В., Полушкин Д. Л., Мордасов М. Д. Исследование структуры полимерного композиционного материала на основе смолы ЭД-20 и нанодисперсии сополимера стирола и акриловой кислоты	136
Новикова Н. О., Ярцев В. П. Древесно-наполненный композит на ос- нове эпоксидной смолы	142
Филатов И. С., Армянинов И. С., Маматказин Т. Р. Влияние параметров ультразвуковой сварки на прочность контактных соединений выводов интегральных микросхем	149
Баршутин С. Н., Мешкова Э. А. Воздействие термоэлектронной эмиссии углеродных частиц на степень ионизации пламени	155
Толчков Ю. Н., Михалева З. А., Ткачев А. Г. Модифицирование композитов строительного назначения углеродными наноструктурами	161
Наши новые профессора, доктора и кандидаты наук.....	173

Mechanical Engineering. Metal Treatment	123
Vanin V. A., Kolodin A. N., Rodina A. A., Fidarov V. Kh. Construction of Forming Chains of Machine Tools with Complex Forming Movements Based on Hydraulic Synchronous Connections.....	123
Material Science. Nanotechnology	136
Mordasov D. M., Makeev P. V., Polushkin D. L., Mordasov M. D. A Study of the Structure of the Polymer Composite Material Based on ED-20 Resin and Copolymer Nanodispersion of Styrene and Acrylic Acid.....	136
Novikova N. O., Yartsev V. P. Wood-Filled Epoxy Resin Composite.....	142
Filatov I. S., Armyaninov I. S., Mamatkazin T. R. The Effect of Ultrasonic Welding Parameters on the Strength of Contact Joints of Integrated Circuit Pins.....	149
Barshutin S. N., Meshkova E. A. Investigation of the Effect of Thermionic Emission of Electrons on the Degree of Flame Ionization	155
Tolchkov Yu. N., Mikhaleva Z. A., Tkachev A. G. Modifying Building Composites with Carbon Nanostructures	161
New Professors, Doctors and Candidates of Sciences	173

**СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ МОДЕЛИ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕАКТОРОМ
ДЕГИДРИРОВАНИЯ ЭТИЛБЕНЗОЛА**

**С. Г. Тихомиров¹, С. Л. Подвальный²,
А. П. Попов¹, О. Г. Неизвестный²**

*Кафедра информационных и управляющих систем,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет
инженерных технологий» (1); г. Воронеж, Россия; aleksej_p_91@mail.ru;
кафедра автоматизированных и вычислительных систем,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет» (2), г. Воронеж, Россия*

Ключевые слова: дегидрирование этилбензола; прогнозирующая модель; система предиктивного управления; температурный режим; тепловой эффект; химическая кинетика.

Аннотация: Выполнен синтез общей структуры математического обеспечения системы упреждающего управления реакторным блоком производства стирола. Разработаны математическое описание химических превращений и модель теплообменных процессов, протекающих во время первой стадии реакции дегидрирования. На основе вычислительного эксперимента получены и отображены результаты исследования динамики работы первой ступени реактора в виде диаграмм изменения концентрации стирола в зависимости от значений технологических параметров. Полученные численные результаты моделирования позволяют осуществлять оперативную оценку влияния снижения величины температуры смеси по мере прохождения ею каталитической зоны реактора на величину выхода стирола и расчет траектории изменения значений управляющих воздействий до определенного момента времени – горизонта управления.

Постановка задачи

Химическая промышленность характеризуется высокой энергоемкостью, что выражается в потреблении больших объемов топлива, а также подводимого тепла и электрической энергии. В любом химико-технологическом процессе основным аппаратом является реактор, в котором протекают химические превращения, сопровождающиеся тепло- и массообменными процессами. Реакционные аппараты, как правило, представляют собой сложную теплоэнергетическую систему. Поэтому, одним из основных критериев, по которому необходимо проводить управление химическим реактором, является снижение объемов потребления энергоресурсов без потери качества и количества произведенного продукта.

В связи с этим, для эффективного управления технологическими объектами в первую очередь необходимо создание математического обеспечения автоматизированных систем управления (АСУ) на основе прогнозирующих моделей, учитывающих тепловые эффекты химических реакций и, позволяющих оперативно строить горизонты предсказания динамики изменения величин выходных параметров объекта управления, для расчета соответствующих значений величин управляющих воздействий.

Одним из наиболее энергозатратных химико-технологических процессов является производство стирола методом двухступенчатого гетерогенного каталитического разложения этилбензола, в результате которого происходит отделение молекулы водорода – дегидрирование от исходного сырья и образование как целевого продукта, так и большого количества побочных веществ. Реактор дегидрирования является адиабатическим непрерывного действия с неподвижным слоем катализатора и относится к типу высокотемпературных реакторов, для которого внедрение предиктивной АСУ на базе прогнозирующих моделей – актуальная научно-производственная задача. Это обусловлено отсутствием средств оперативного прогнозирования: величины активности каталитического слоя, изменения значений технологических параметров на протяжении всего периода эксплуатации реактора и, как следствие, количества выделившегося стирола, что делает невозможным выработку управляющих сигналов и построение горизонта управления для предотвращения падения концентрации целевого продукта на выходе из реакторных ступеней.

Синтез структуры математического обеспечения системы управления

Решение поставленной задачи невозможно без комплексного математического описания кинетических закономерностей с учетом каталитической активности, теплового эффекта реакции, а также значений гидродинамических параметров. Поэтому начальной стадией проектирования предиктивной системы управления является синтез математического обеспечения АСУ, основу которого должны составлять математические модели реакторных ступеней дегидрирования, прогнозирующих изменение скоростей химических превращений в зависимости от варьирования технологических параметров процесса на протяжении всего периода эксплуатации реактора:

- математическое описание теплообменных процессов, протекающих в ступенях реакторного блока;
- математические зависимости, описывающие кинетику основных и побочных химических реакций, происходящих в результате дегидрирования этилбензольной шихты;
- модель динамики коксообразования на каталитической поверхности ступеней реактора;
- модель снижения активности каталитической системы в зависимости от изменения температурного режима протекания процесса и скорости образования отложений кокса;
- модели возмущающих воздействий, ошибок измерений и шумов.

Исходя из конструкции реакторного блока и особенностей его эксплуатации, структурно математическая модель строится по модульному принципу [1] и подразделяется на две составляющие, каждая из которых описывает процессы в первой и второй ступенях соответственно, при этом выходные потоки первой части модели являются входными параметрами для второй. Каждая из данных частей, в свою очередь, включает в себя вышеперечисленные модели как составные элементы математического описания теплообменных и химических процессов,

а также механизмов отложения коксовых отложений и падения активности каталитической системы. Структурные связи между этими элементами жесткие, так как основные связующие параметры:

- температура реакционной смеси на входах в ступени реактора;
- величины снижения температуры потока реагентов по длине реакционных зон ступеней реактора.

На основе системного анализа и проведенных исследований [2 – 4] структурная схема математического описания процесса дегидрирования и схема тепловых потоков в первой ступени реакторного блока представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

На рисунке 1 даны следующие обозначения: l – расстояние от входа в реакторную ступень ($0 < l < l_k$), м; l_k – длина реакторной ступени, м; act_0^1, act_0^2 – активность катализатора в первой и второй ступенях реактора в начале рабочего цикла; K_{koks0}^1, K_{koks0}^2 – концентрация кокса на каталитических слоях в первой и второй ступенях реактора в начале рабочего цикла, %; T_{p0}^1, T_{p0}^2 – температура водяного пара на входах в первую и вторую ступени реактора соответственно, К; m_{p0}^1, m_{p0}^2 – расход водяного пара, подаваемого в смесительную камеру первой ступени и межступенчатый перегреватель второй ступени соответственно, кг/с; T_{sh0}^1 – температура шихты на входе в первую ступень реакторного блока соответственно, К; m_{sh} – расход шихты на входе в реактор, т/ч; $G_A^1(0), G_{prod}^1(0)$ – концентрация стирола и побочных продуктов в шихте на входе в первую ступень реакторного блока соответственно, моль/л; $T_{RZ}^1(l), T_{RZ}^2(l)$ – текущие значения температуры в реакционных зонах первой и второй ступеней реакторного блока, К; $act^1(l), act^2(l)$ – текущие значения активности катализатора в реакционных зонах первой и второй ступенях реакторного блока; $K_{koks}^1(l), K_{koks}^2(l)$ – текущие значения концентрации кокса на каталитическом слое первой и второй ступеней реакторного блока, %; $G_A^1(l), G_A^2(l)$ – текущие значения концентрации стирола в первой и второй ступенях реакторного блока, моль/л; $G_{prod}^1(l), G_{prod}^2(l)$ – текущие значения суммарной концентрации побочных продуктов по длине реакционной зоны первой и второй ступеней реакторного блока соответственно, моль/л; $T_{sh}^1(l_k), T_{sh}^2(l_k)$ – температуры шихты на выходах из первой (на входе во вторую ступень) и второй ступеней соответственно, К; $G_A^1(l_k), G_A^2(l_k)$ – концентрации стирола на выходе из первой (на входе во вторую ступень) и второй ступеней соответственно, моль/л; $G_{prod}^1(l_k), G_{prod}^2(l_k)$ – суммарные концентрации продуктов на выходе из первой (на входе во вторую ступень) и второй ступеней соответственно, моль/л.

На рисунке 2 приведены обозначения: Q_0^{sh} – количество теплоты потока этилбензольной шихты на входе в смесительную камеру, Дж; Q_0^p – количество теплоты потока водяного пара на входе в смесительную камеру, Дж; Q_0^{sm} – количество теплоты смеси на выходе из смесительной камеры (на входе в ступень

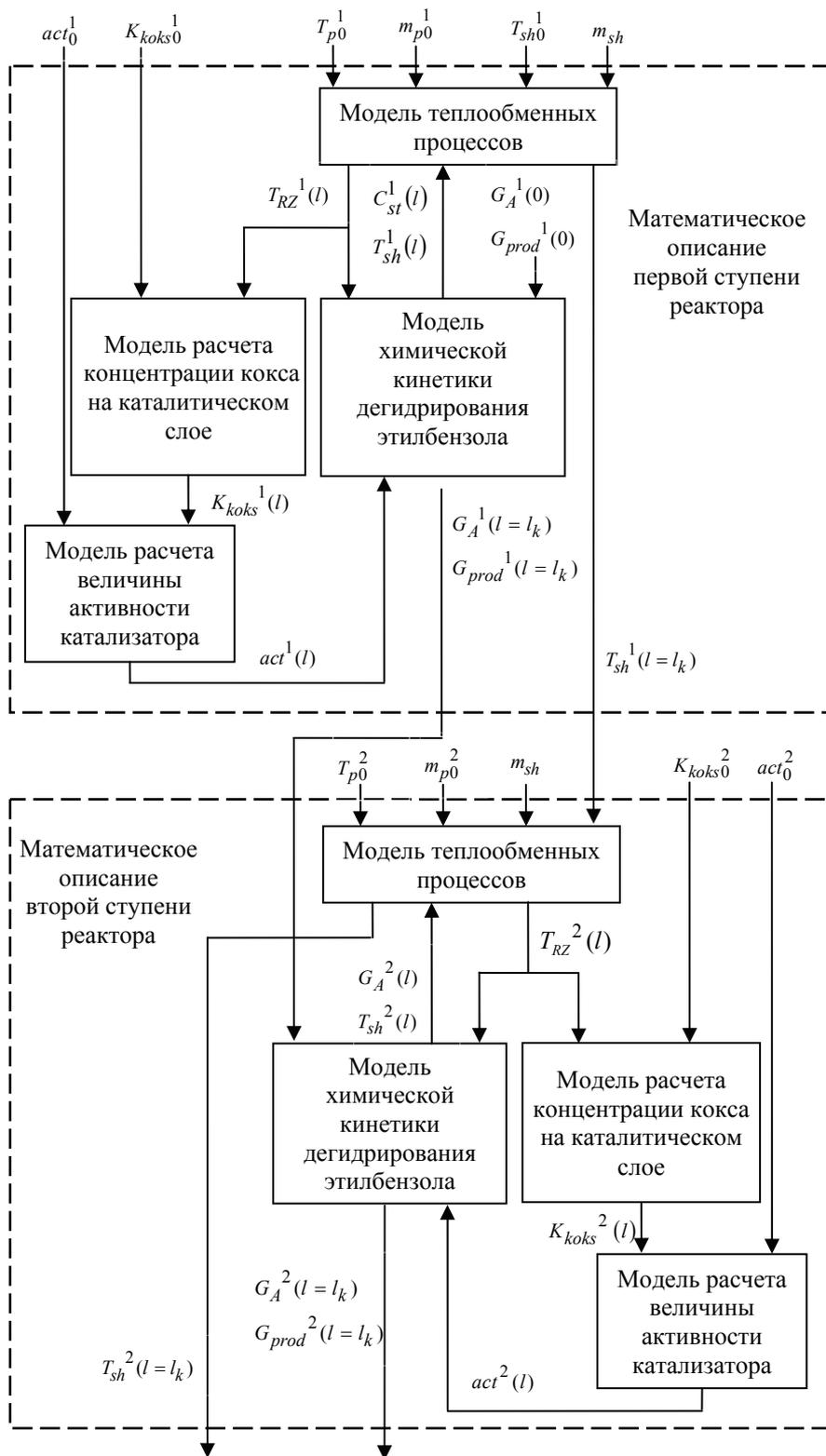


Рис. 1. Структурная схема математического описания реактора производства стирола

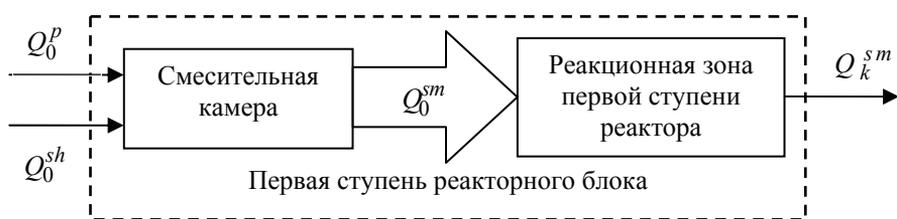


Рис. 2. Структурная схема тепловых потоков в первой ступени реакторного блока производства стирола

реактора), Дж; Q_k^{sm} – количество теплоты парэтилбензольной смеси на выходе из реакторной ступени, Дж.

В виду сложности конструкции реактора, условий эксплуатации катализатора и механизма химических реакций, синтез математического описания процесса дегидрирования целесообразно проводить в несколько этапов.

1. Декомпозиция задачи моделирования технологического процесса на последовательность математических подзадач, каждая из которых описывает:

- отдельный физический или совокупность химических процессов в реакционной зоне (теплообмен в первой и второй ступенях реактора, коксообразование и снижение активности каталитического слоя, изменение концентраций основных и побочных компонентов смеси);

- степень влияния шумов, ошибок измерений и возмущений на значения величин управляемых параметров объекта.

2. Выявление структурных и логических связей между составными частями модели технологического процесса.

3. Проведение вычислительных экспериментов и визуализация результатов, посредством которых формируется база знаний, отображающая изменения выходных величин ступеней реактора в зависимости от варьирования одного или нескольких технологических параметров, управляющих и/или возмущающих воздействий.

4. Композиция моделей, описывающих динамику протекания физико-химических процессов реактора в математическое обеспечение АСУ отделения производства стирола, и разработка алгоритма расчета контролируемых и регулируемых параметров ступеней объекта управления на определенном временном интервале функционирования производственной линии.

Для эффективного управления и нахождения оптимальных значений и траекторий изменения технологических параметров функционирования реакторных ступеней необходимо разработать модель, описывающую химическую кинетику процесса, что в конечном итоге позволит выявить степень влияния технологических параметров и состояния каталитической поверхности на скорость основных и побочных реакций.

Выполненные ранее научные работы [2 – 4], не позволяют использовать разработанные в них модели для построения достоверного горизонта предсказания изменения концентраций продуктов химических реакций в динамическом режиме. Приведенные модели [2, 3] могут быть применены только при условии стационарности значений основных технологических параметров реакционного аппарата: расходов этилбензольной шихты и энергоносителей, температуры и активности катализатора по всей длине реакционной зоны. Усовершенствованная версия модели, представленная в [4], позволяет выполнять расчет скоростей химической реакции с учетом падения активности катализатора, но так же как и при использовании других моделей, расчет процесса возможно провести только

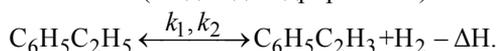
путем нахождения численного решения системы дифференциальных уравнений, описывающей все элементарные реакции (основные и побочные) с предварительной оценкой большого числа значений констант скоростей в условиях неопределенности траекторий изменения концентраций продуктов по длине реакторных ступеней.

Моделирование кинетики химических реакций распада этилбензола

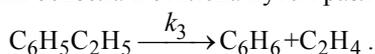
Химические превращения, возникающие при отделении молекул водорода от этилбензола, протекают на поверхности неподвижного слоя катализатора в газовой фазе и относятся к группе гетерогенно-каталитических реакций, кинетика которых в большинстве случаев очень сложна. В рассматриваемом случае это обусловлено конструктивными особенностями реактора, многостадийностью протекания химических реакций, мультикомпонентностью реакционной смеси и использованием каталитических систем. За время прохождения шихты через реакторные ступени в реакционном объеме протекает множество реакций различных видов (обратимые, последовательные, параллельные, мономолекулярные и бимолекулярные), в результате которых происходит выделение таких компонентов, как бензол, толуол, этилен, метан, водород, углерод, углеродсодержащие газы и образование целевого продукта – стирола.

Анализ последовательности химических превращений позволил сделать вывод, что образование таких продуктов, как водород, углерод и оксиды углерода, выделяющихся в результате побочных реакций разложения метана и его конверсии водяным паром, не оказывают существенного влияния на динамику протекания процесса и концентрацию целевого продукта на выходе из реакторных ступеней ввиду малого содержания данного вещества (метана) в контактном газе. Таким образом, для разработки модели достаточно рассмотреть реакции, в процессе которых происходит выделение стирола, бензола, этилена, толуола и метана.

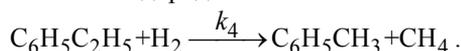
1. Стадия образования стирола и водорода путем отщепления молекул водорода от этилбензольной шихты (стадия дегидрирования)



2. Стадия образования бензола и этилена путем разложения этилбензола



3. Реакция образования толуола и метана в результате протекания реакции взаимодействия этилбензола и водорода



Скорости данных химических превращений определяются следующими зависимостями:

– $r_1 = k_1 G_A$ – скорость образования стирола и водорода;

– $r_2 = k_2 G_B G_C$ – скорость обратной реакции (взаимодействие стирола и водорода);

– $r_3 = k_3 G_A$ – скорость образования бензола и этилена;

– $r_4 = k_4 G_A G_C$ – скорость образования толуола и метана,

где r_i , $i = 1, \dots, 4$ – скорость i -й реакции, моль/(л·с); ΔH – тепловой эффект реакции, Дж/кг; G_A , G_B , G_C – концентрации стирола, этилбензола и водорода соответственно, моль/л; k_1 – константа скорости образования стирола и водорода (прямой стадии реакции дегидрирования), с^{-1} ; k_2 – константа скорости обратной стадии дегидрирования, л/(моль·с); k_3 – константа скорости образования бензола и этилена, с^{-1} ; k_4 – константа скорости образования толуола и метана, л/(моль·с).

В соответствии с выделенными стадиями процесса математическая модель представляется в виде системы дифференциальных уравнений, описывающей скорости изменения концентраций компонентов смеси по длине реакторных ступеней:

$$\left\{ \begin{array}{l} \upsilon \frac{dG_A}{dl} = k_1 G_B - k_2 G_A G_B; \\ \upsilon \frac{dG_B}{dl} = k_2 G_A G_B - k_1 G_B - k_3 G_B - k_4 G_B G_C; \\ \frac{dG_C}{dl} = k_1 G_B - k_2 G_A G_B - k_4 G_B G_C; \\ \upsilon \frac{dG_D}{dl} = k_3 G_B; \\ \upsilon \frac{dG_E}{dl} = k_3 G_B; \\ \upsilon \frac{dG_F}{dl} = k_4 G_B G_C; \\ \upsilon \frac{dG_g}{dl} = k_4 G_B G_C; \\ G_A|_{l=0} = G_C|_{l=0} = G_E|_{l=0} = G_g|_{l=0} = 0; \\ G_B|_{l=0} = 52,266, G_D|_{l=0} = 0,071; \\ G_F|_{l=0} = 0,060, \end{array} \right. \quad (1)$$

где υ – линейная скорость потока, м/с; G_D , G_E , G_F , G_g , – концентрации бензола, этилена, толуола и метана соответственно, моль/л.

Моделирование теплообменных процессов в первой ступени реакторного блока

Реакция дегидрирования сопровождается эндотермическим тепловым эффектом. Количество теплоты, поглощаемое при выделении 1 кг стирола, составляет 100...130 кДж [5, 6].

Реактор производства стирола представляет собой два последовательно соединенных аппарата шахтного типа, вдоль стенок реакционных зон которых загружен неподвижный слой катализатора. Каждый из аппаратов реакторного блока имеет свои конструктивные особенности, учитывая которые и принимая во внимание процессы, протекающие в них, разработку математического описания теплообменных процессов необходимо осуществлять отдельно для каждой из ступеней.

Рассмотрим первую ступень. Данный агрегат снабжен смесительной камерой, предназначенной для образования парэтилбензольной смеси из потоков греющего пара и шихты (см. рис. 2). Задача исследования динамики функционирования ступени решается посредством расчета концентрации целевого продукта на основе модели химической кинетики (1) с использованием уравнений теплового баланса и учетом потерь тепла реакционного потока по длине ступени для диапазона нагрузки по сырью в 20,00...31,75 т/ч. Принимая во внимание, что используемый реакционный аппарат является адиабатическим и с учетом теплового эффекта реакции образования стирола, уравнения теплового баланса составных элементов первой ступени выглядят следующим образом.

Статическая форма.

Уравнение теплового баланса смесительной камеры:

$$Q_0^P + Q_0^{sh} = Q_0^{sm}; \quad (2)$$

$$C_0^{sh} m_0^{sh} T_0^{sh} + C_0^P m_0^P T_0^P = (C_0^{sh} m_0^{sh} + C_0^P m_0^P) T_0^{sm}. \quad (3)$$

Уравнение теплового баланса реакционной зоны:

$$Q_0^{sm} = Q_k^{sm} + Q^r + Q^{pot}; \quad (4)$$

$$\left(C_0^{sh} m_0^{sh} + c_0^P m_0^P \right) T_0^{sm} - \Delta H G_A S l_k M_A = \left(C_{l_k}^{sh} m_0^{sh} + c_{l_k}^P m_0^P \right) T_{l_k}^{sm}, \quad (5)$$

где Q^r – количество теплоты, поглощаемое при образовании стирола за время прохода потока реагентов через реакторную ступень, Дж; $Q^{pot} = 0$ – количество теплоты, поглощаемое при теплообмене с окружающей средой, Дж; C_0^{sh} – удельная теплоемкость шихты на входе в реакционную зону, Дж/(кг·К); m_0^{sh} – расход шихты, кг/с; T_0^{sh} – температура шихты на входе в смесительную камеру, К; c_0^P – удельная теплоемкость водяного пара на входе в реакционную зону, Дж/(кг·К); m_0^P – расход водяного пара, кг/с; T_0^P – температура пара на входе в смесительную камеру, К; T_0^{sm} , $T_{l_k}^{sm}$ – температуры парозтилбензольной смеси на выходе из смесительной камеры и реакторной ступени соответственно, К; $\Delta H = 1130436$ – количество энергии, затраченной на образование одного килограмма стирола, Дж/кг; G_A – концентрация выделившегося стирола, моль/л; S – площадь сечения реактора, м²; l_k – длина реакторной ступени, м; M_A – молярная масса стирола, кг/моль; $C_{l_k}^{sh}$, $c_{l_k}^P$ – удельные теплоемкости шихты и водяного пара на выходе из реакционной зоны соответственно, Дж/(кг·К).

Решения уравнений (3) и (5) относительно температуры парозтилбензольной смеси, поступающей в зону реакции из смесительной камеры, и температуры контактного газа на выходе имеют вид:

$$T_0^{sm} = \frac{C_0^{sh} m_0^{sh} T_0^{sh} + c_0^P m_0^P T_0^P}{C_0^{sh} m_0^{sh} + c_0^P m_0^P}; \quad (6)$$

$$T_k^{sm} = \frac{\left(C_0^{sh} m_0^{sh} + c_0^P m_0^P \right) T_0^{sm} - \Delta H G_A S l_k M_A}{C_{l_k}^{sh} m_0^{sh} + c_{l_k}^P m_0^P}. \quad (7)$$

Динамическая форма.

Исходя из вышеизложенного, изменение температуры реакционной смеси за время прохождения ею первой ступени описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{dT}{dl} = - \frac{\Delta H G_A(l) S l M_A}{C^{sh}(l) m_0^{sh} + c^P(l) m_0^P}, \quad (8)$$

где $G_A(l)$ – текущее значение концентрации выделившегося стирола, моль/л; $C^{sh}(l)$, $c^P(l)$ – текущие значения теплоемкостей шихты и водяного пара соответственно, Дж/(кг·К).

Исследование динамики работы первой реакторной ступени

В качестве основного допущения при проведении вычислительного эксперимента на основе модели процесса дегидрирования при различных значениях расхода сырья – этилбензольной шихты, принято постоянство величины активности каталитического слоя в произвольной точке реакторного блока. В процессе выполнения расчетов объектом моделирования является первая ступень реакторного блока со следующими конструктивными параметрами: диаметр 4,5 м, высота 7,4 м; толщина слоя катализатора 0,95 м; расход этилбензольной шихты 20,00...31,50 т/ч; количество водяного пара 3 : 1 по отношению к расходу шихты; температура парэтилбензольной смеси на входе в реактор 560 °С.

Алгоритм расчета количества произведенного стирола на основе предложенных моделей (1) – (8) заключается в выполнении следующей последовательности математических операций:

1) расчет концентрации компонентов этилбензольной шихты на входе в смесительную камеру первой ступени:

$$m_0^A = x_0^A m^{sh}; \quad n_0^A = \frac{m_0^A}{M^A}; \quad G_0^A = \frac{n_0^A}{Sl};$$

$$m_0^B = x_0^B m^{sh}; \quad n_0^B = \frac{m_0^B}{M^B}; \quad G_0^B = \frac{n_0^B}{Sl};$$

$$m_0^C = x_0^C m^{sh}; \quad n_0^C = \frac{m_0^C}{M^C}; \quad G_0^C = \frac{n_0^C}{Sl};$$

$$m_0^D = x_0^D m^{sh}; \quad n_0^D = \frac{m_0^D}{M^D}; \quad G_0^D = \frac{n_0^D}{Sl};$$

$$m_0^E = x_0^E m^{sh}; \quad n_0^E = \frac{m_0^E}{M^E}; \quad G_0^E = \frac{n_0^E}{Sl};$$

$$m_0^F = x_0^F m^{sh}; \quad n_0^F = \frac{m_0^F}{M^F}; \quad G_0^F = \frac{n_0^F}{Sl};$$

$$m_0^G = x_0^G m^{sh}; \quad n_0^G = \frac{m_0^G}{M^G}; \quad G_0^g = \frac{n_0^G}{Sl};$$

$$m^P = 3,5 m^{sh},$$

где m^{sh} , m^P – расход шихты и водяного пара соответственно, кг/с; x_0^A , x_0^B , x_0^C , x_0^D , x_0^E , x_0^F , x_0^G – доли соответственно стирола, этилбензола, водорода, бензола, этилена, толуола и метана в шихте на входе в смесительную камеру; m_0^A , m_0^B , m_0^C , m_0^D , m_0^E , m_0^F , m_0^G – расход соответственно стирола, этилбензола, водорода, бензола, этилена, толуола и метана на входе в смесительную камеру, кг/с; n_0^A , n_0^B , n_0^C , n_0^D , n_0^E , n_0^F , n_0^g – мольный расход соответственно стирола, этилбензола, водорода, бензола, этилена, толуола и метана на входе в смесительную камеру, моль/с; M^A , M^B , M^C , M^D , M^E , M^F , M^G – молярные массы соответственно

стирола, этилбензола, водорода, бензола, этилена, толуола и метана, кг/моль; $G_0^A, G_0^B, G_0^C, G_0^D, G_0^E, G_0^F, G_0^G$ – величины концентраций соответственно стирола, этилбензола, водорода, бензола, этилена, толуола и метана на входе в смесительную камеру, моль/л;

2) расчет значений теплоемкостей компонентов шихты на входе в смесительную камеру:

$$c_0^A = \frac{a^A T_0^{sh^3} + b^A T_0^{sh^2} + c^A T_0^{sh} + d^A}{M^A}; \quad c_0^B = \frac{a^B T_0^{sh^3} + b^B T_0^{sh^2} + c^B T_0^{sh} + d^B}{M^B};$$

$$c_0^C = \frac{a^C T_0^{sh^3} + b^C T_0^{sh^2} + c^C T_0^{sh} + d^C}{M^C}; \quad c_0^E = \frac{a^E T_0^{sh^3} + b^E T_0^{sh^2} + c^E T_0^{sh} + d^E}{M^E};$$

$$c_0^F = \frac{a^F T_0^{sh^3} + b^F T_0^{sh^2} + c^F T_0^{sh} + d^F}{M^F}; \quad c_0^G = \frac{a^G T_0^{sh^3} + b^G T_0^{sh^2} + c^G T_0^{sh} + d^G}{M^G};$$

$$c_0^P = a^P T_0^{p^2} + b^P T_0^p + c^P,$$

где $a^A = 0,0000001036$; $b^A = -0,0004146717$; $c^A = 0,6254464646$; $d^A = -30,1606060605$;
 $a^B = 0,0000000850$; $b^B = -0,0004010324$; $c^B = 0,6736931565$; $d^B = -47,2540720961$;
 $a^C = 0,0000000010$; $b^C = -0,0000006666$; $c^C = 0,0012798929$; $d^C = 28,5979567189$;
 $a^D = 0,0000000628$; $b^D = -0,0002701486$; $c^D = 0,4429515047$; $d^D = -27,0555339901$;
 $a^E = 0,0000000272$; $b^E = -0,0001126843$; $c^E = 0,1841492929$; $d^E = -4,2521212121$;
 $a^F = 0,0000000752$; $b^F = -0,0003310446$; $c^F = 0,5507007835$; $d^F = -34,7286267829$;
 $a^G = -0,0000000084$; $b^G = 0,0000039757$; $c^G = 0,0590733890$; $d^G = 17,4810686085$;
 $a^P = -0,00013547$; $b^P = 0,93538188$; $c^P = 1500,3648097$;

здесь $c_0^A, c_0^B, c_0^C, c_0^D, c_0^E, c_0^F, c_0^G, c_0^P$ – удельные теплоемкости соответственно стирола, этилбензола, водорода, бензола, этилена, толуола, метана и водяного пара на входе в смесительную камеру, Дж/(кг·К);

3) определение общей теплоемкости шихты на входе в смесительную камеру

$$C_0^{sh} = m_0^A c_0^A + m_0^B c_0^B + m_0^C c_0^C + m_0^D c_0^D + m_0^E c_0^E + m_0^F c_0^F + m_0^G c_0^G;$$

4) расчет температуры парозтилбензольной смеси на выходе из смесительной камеры (на входе в реакционную зону) по формуле (6);

5) расчет системы уравнений (1);

6) определение величины изменения температуры реакционной смеси по длине реакторной ступени по формуле (8);

7) расчет значений теплоемкости компонентов шихты с учетом снижения температуры смеси на дифференциальном участке реакторной ступени:

$$c^A(l) = \frac{a^A T(l)^3 + b^A T(l)^2 + c^A T(l) + d^A}{M^A};$$

$$c^B(l) = \frac{a^B T(l)^3 + b^B T(l)^2 + c^B T(l) + d^B}{M^B};$$

$$c^C(l) = \frac{a^C T(l)^3 + b^C T(l)^2 + c^C T(l) + d^C}{M^C};$$

$$c^D(l) = \frac{a^D T(l)^3 + b^D T(l)^2 + c^D T(l) + d^D}{M^D};$$

$$c^E(l) = \frac{a^E T(l)^3 + b^E T(l)^2 + c^E T(l) + d^E}{M^E};$$

$$c^F(l) = \frac{a^F T(l)^3 + b^F T(l)^2 + c^F T(l) + d^F}{M^F};$$

$$c^G(l) = \frac{a^G T(l)^3 + b^G T(l)^2 + c^G T(l) + d^G}{M^G};$$

$$c^P(l) = a^P T(l)^2 + b^P T(l) + c^P,$$

где $T(l)$ – текущее значение температуры в реакционной зоне, К;

8) определение текущего значения теплоемкости этилбензолной шихты с учетом снижения температуры смеси

$$c^{sh}(l) = m^A(l)c^A(l) + m^B(l)c^B(l) + m^C(l)c^C(l) + m^D(l)c^D(l) + m^E(l)c^E(l) + m^F(l)c^F(l) + m^G(l)c^G(l);$$

9) перерасчет констант скоростей химических реакций:

$$k_1(l) = k_{1,0} e^{\frac{-E_a}{RT(l)}};$$

$$k_2(l) = k_{2,0} e^{\frac{-E_a}{RT(l)}};$$

$$k_3(l) = k_{3,0} e^{\frac{-E_a}{RT(l)}};$$

$$k_4(l) = k_{4,0} e^{\frac{-E_a}{RT(l)}};$$

где $k_i(l)$ – скорость образования i -го компонента; $k_{i,0}$ – предэкспоненциальный множитель; $E_a = 152$ кДж/моль – энергия активации дегидрирования этилбензола, Дж/моль [7]; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); $T(l)$ – температура реактора, К;

10) пункты 5 – 9 алгоритма повторяются циклически для N шагов, где $N = l_k/\Delta l$, Δl – величина шага по длине реакторной ступени, м.

Расчет процесса дегидрирования проводится для диапазона значений расхода этилбензола. При этом следует отметить, что решение приведенной системы уравнений (1) относится к прямой кинетической задаче. Предварительно, с помощью численных методов оптимизации, выполнена оценка предэкспоненциальных множителей уравнений расчета констант скоростей химических реакций: $k_{1,0} = 0,224$; $k_{2,0} = 0,0016$; $k_{3,0} = 0,016$; $k_{4,0} = 0,0016$.

Результаты и выводы

Результаты математических исследований процессов в первой ступени реакторного блока, выполненные при различных гидродинамических параметрах и температурных режимах (изотермическом и неизотермическом), представлены в виде числовых значений в табл. 1 и трехмерных диаграмм на рис. 3, 4.

Таблица 1

Изменение температуры потока парэтилбензольной смеси и концентрации стирола по длине первой реакторной ступени при различных величинах расхода этилбензольной шихты

Расход шихты, т/ч	Длина первой ступени реактора, м	Время контакта реакционной смеси с катализатором, с	Режим работы реактора		
			неизотермический		изотермический при $T = 560\text{ }^{\circ}\text{C}$
			температура реакционного потока, $^{\circ}\text{C}$	концентрация стирола на выходе из первой ступени, %	
20		0	560	0	
	1	0,265	554	5,33	5,67
	2	0,531	549	9,68	10,98
	3	0,797	545	13,34	15,92
	4	1,062	542	16,47	20,50
	5	1,328	539	19,21	24,75
	6	1,593	536	21,63	28,67
	7	1,859	534	23,79	32,28
	7,4	1,965	533	24,59	33,63
24		0	560	0	
	1	0,221	555	4,51	4,75
	2	0,442	551	8,30	9,24
	3	0,664	547	11,55	13,47
	4	0,885	544	14,39	17,45
	5	1,106	541	16,90	21,18
	6	1,327	539	19,15	24,66
	7	1,548	537	21,17	27,92
	7,4	1,637	536	21,93	29,16
28		0	560	0	
	1	0,190	556	3,90	4,08
	2	0,379	552	7,26	7,97
	3	0,569	549	10,19	11,67
	4	0,758	546	12,78	15,18
	5	0,948	543	15,10	18,50
	6	1,137	541	17,20	21,63
	7	1,327	539	19,10	24,58
	7,4	1,403	538	19,81	25,71
31,75		0	560	0	
	1	0,167	556	3,47	3,61
	2	0,335	553	6,50	7,07
	3	0,502	550	9,18	10,38
	4	0,669	547	11,58	13,53
	5	0,836	545	13,74	16,54
	6	1,004	543	15,70	19,39
	7	1,171	541	17,50	22,10
	7,4	1,238	540	18,18	23,15

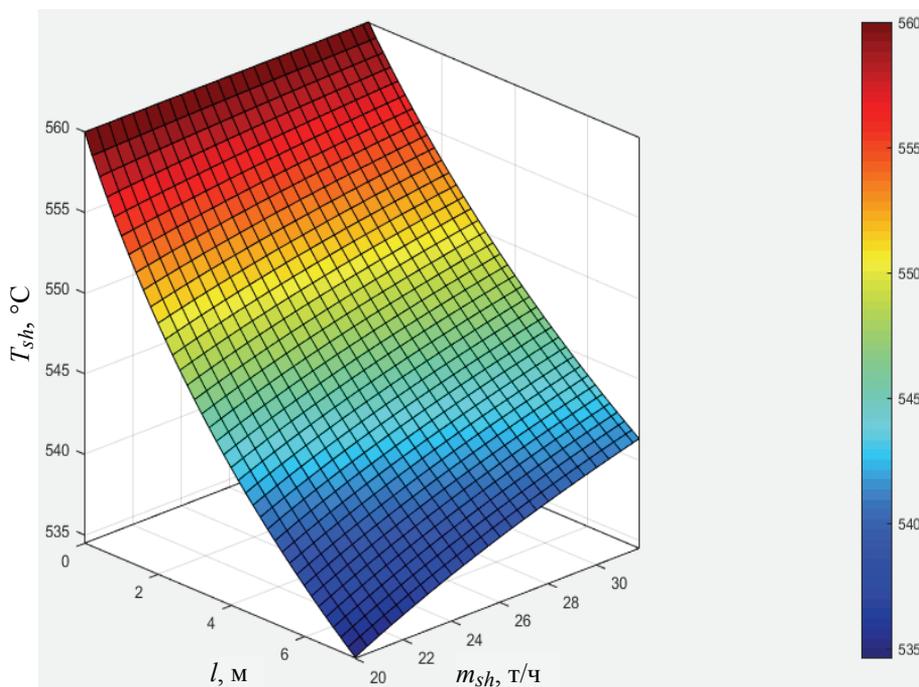


Рис. 3. Диаграмма снижения температуры реакционной смеси по длине реакционной зоны первой ступени реактора при различных значениях расхода шихты

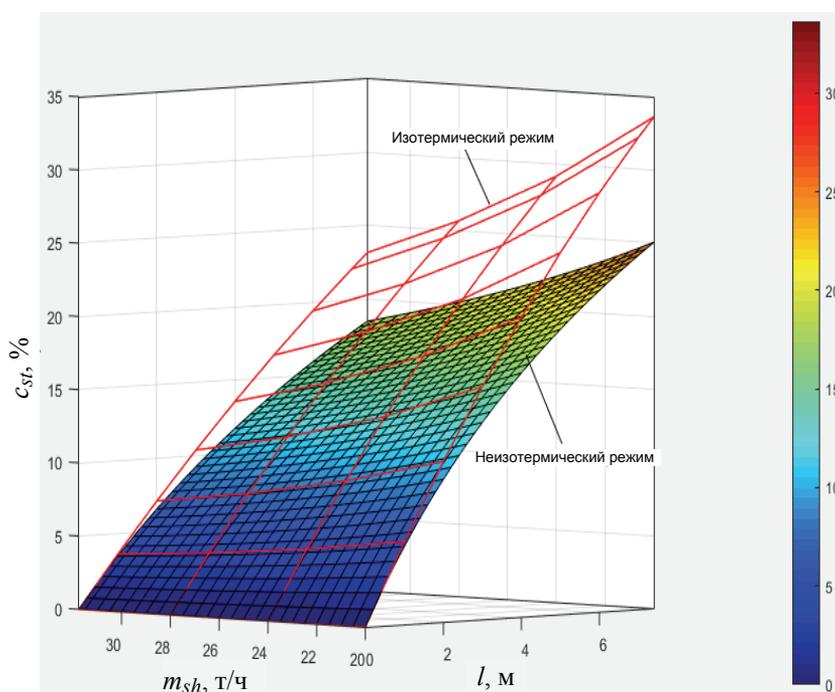


Рис. 4. Диаграмма изменения концентрации стирола по длине первой ступени реактора от расхода этилбензольной шихты при изотермическом и неизотермическом режимах

Заключение

Представлена структурная схема синтеза математического обеспечения и решение основных задач моделирования процесса производства стирола как объекта управления:

– уточнение модели кинетики химических превращений для расчета концентраций компонентов реакционной смеси, соответствующих данным промышленной эксплуатации в зависимости от нагрузки реактора по сырью и температурного режима;

– составление уравнений теплообменных процессов, происходящих в первой ступени реактора при прохождении шихты через каталитическую зону.

В результате проведенных исследований получены поверхности, соответствующие изотермическому и неизотермическому режимам работы аппарата первой стадии дегидрирования. Установлено, что концентрация стирола в конечной точке реакционной зоны и скорость ее изменения снижается по мере увеличения расхода сырья, проходящего через реакторную ступень. Приведенные в табл. 1 численные значения позволяют провести оценку степени влияния фактора снижения температуры смеси за время контакта с каталитической системой в соответствии с гидродинамическим режимом функционирования объекта. Таким образом, полученные траектории изменения концентрации целевого продукта являются основой для оперативной оценки приращения значений температуры парэтилбензольной смеси, поступающей из смесительной камеры, что целесообразно обеспечить с помощью предиктивной системы программного управления расходами энергоносителей (греющего пара и топливного газа) в соответствии с нагрузкой реактора по сырью.

Список литературы

1. Подвальный, С. Л. Модульная структура системы многоальтернативного моделирования процессов полимеризации / С. Л. Подвальный, А. В. Барабанов // Вестн. Воронежского гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 9, № 5-1. – С. 41 – 43.
2. Островский, Г. М. Моделирование сложных химико-технологических схем / Г. М. Островский, Ю. М. Волин. – М. : Химия, 1975. – 312 с.
3. Разработка математической модели кинетики процесса дегидрирования этилбензола в двухступенчатом адиабатическом реакторе непрерывного действия / В. К. Битюков [и др.] // Вестн. Воронежского гос. ун-та инженерных технологий. – 2015. – № 2 (64). – С. 55 – 60.
4. Моделирование кинетики процесса дегидрирования этилбензола с учетом дезактивации каталитического слоя реактора / В. К. Битюков [и др.] // Вестн. Воронежского гос. ун-та инженерных технологий. – 2017. – Т. 79, №1 (71). – С. 73 – 80. doi: 10.20914/2310-1202-2017-1-73-80
5. Кирпичников, П. А. Альбом технологических схем основных производств промышленности синтетического каучука : учеб. пособие для вузов / П. А. Кирпичников, В. В. Береснев, Л. М. Попова. – 2-е изд., перераб. – Л. : Химия, 1986. – 224 с.
6. Пат. 2214992 Российская Федерация, МПК С07С 15/46 (2000.01), С07С 5/333 (2000.01), В01J 23/78 (2000.01), В01J 23/94 (2000.01). Способ дегидрирования этилбензола до стирола / Р. Ецци, Д. Санфилиппо ; заявитель и патентообладатель С. П. А. Снампроджетти – № 2002107129/04 ; заявл. 19.09.2000 ; опубл. 27.10.2003, Бюл. № 30. – 17 с.
7. Тимофеев, В. С. Принципы технологии основного органического и нефтехимического синтеза : учеб. пособие для вузов / В. С. Тимофеев, Л. А. Серафимов. – 2-е изд. – М. : Высш. шк., 2003. – 536 с.

Synthesis of the Structure of a Predictive Model of Control System for Ethylbenzene Dehydrogenation Reactor

S. G. Tikhomirov¹, S. L. Podvalnyy², A. P. Popov¹, O. G. Neizvestnyy²

Department of Information and Control Systems, Voronezh State University of Engineering Technologies (1), Voronezh, Russia; aleksej_p_91@mail.ru;

Department of Automated and Computing Systems, Voronezh State Technical University (2), Voronezh, Russia

Keywords: ethylbenzene dehydrogenation; predictive model; predictive control system; temperature conditions; thermal effect; chemical kinetics.

Abstract: The synthesis of the general structure of the mathematical support of the proactive control system of the phenyl ethylene production reactor unit was carried out. A mathematical description of chemical transformations and a model of heat exchange processes occurring during the first stage of the dehydration reaction were developed. Using the computational experiment, the results of the study of the dynamics of the first stage of the reactor in the form of diagrams of changes in phenyl ethylene concentration depending on the values of the process parameters were obtained and described. The numerical simulation results made it possible to assess quickly the effect of reducing the temperature of the mixture – as it passed through the catalytic zone of the reactor – on the phenyl ethylene output, and to calculate the trajectory of changes in the values of control actions up to a certain point in time – the control horizon.

References

1. Podval'nyy S.L., Barabanov A.V. [The modular structure of the system of multi-alternative modeling of polymerization processes], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Voronezh State Technical University], 2013, vol. 9, no. 5-1, pp. 41-43. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Ostrovskiy G.M., Volin Yu.M. *Modelirovaniye slozhnykh khimiko-tekhnologicheskikh skhem* [Modeling of complex chemical-technological schemes], Moscow: Khimiya, 1975, 312 p. (In Russ.)
3. Bityukov V.K., Zhatova I.A., Alekseyev M.V., Popov A.P. [Development of a mathematical model of the kinetics of ethylbenzene dehydrogenation in a two-stage adiabatic continuous reactor], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy* [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technology], 2015, no. 2 (64), pp. 55-60. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Bityukov V.K., Popov A.P., Tikhomirov S.G., Neizvestnyy O.G. [Simulation of the kinetics of the process of ethylbenzene dehydrogenation taking into account deactivation of the catalytic layer of the reactor], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy* [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technology], 2017, vol. 79, no.1 (71), pp. 73-80, doi: 10.20914/2310-1202-2017-1-73-80 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Kirpichnikov P.A., Beresnev V.V., Popova L.M. *Al'bom tekhnologicheskikh skhem osnovnykh proizvodstv promyshlennosti sinteticheskogo kauchuka: ucheb. posobiye dlya vuzov* [Album of technological schemes of the main production of the synthetic rubber industry: studies. manual for universities], Leningrad: Khimiya, 1986, 224 p. (In Russ.)
6. Yetsti R, Sanfilippo D. *Sposob degidrirovaniya etilbenzola do stirola* [The way dehydrogenation of ethylbenzene to styrene], Russian Federation, 2003, Pat. 2214992 (In Russ.)

7. Timofeyev V.S., Serafimov L.A. *Printsipy tekhnologii osnovnogo organicheskogo i neftekhimicheskogo sinteza: ucheb. posobiye dlya vuzov* [Principles of Technology for Basic Organic and Petrochemical Synthesis: studies. manual for universities], Moscow: Vysshaya shkola, 2003, 536 p. (In Russ.)

Synthese der Struktur des Vorhersagesteuerungssystems des Ethylbenzol-Dehydrierungsreaktors

Zusammenfassung: Es ist die Synthese der allgemeinen Struktur der mathematischen Unterstützung des proaktiven Kontrollsystems der Styrol-Produktionsreaktoreinheit erfüllt. Eine mathematische Beschreibung chemischer Umwandlungen und ein Modell von Wärmeaustauschprozessen, die während der ersten Phase der Dehydrierungsreaktion auftreten, sind entwickelt. Basierend auf dem Rechenversuch sind die Ergebnisse der Untersuchung der Dynamik der ersten Stufe des Reaktors in Form von Diagrammen der Änderungen der Konzentration des Styrols in Abhängigkeit von den Werten der technologischen Parameter erhalten und angezeigt. Die erhaltenen numerischen Simulationsergebnisse ermöglichen es, die Auswirkung der Verringerung der Temperatur des Gemisches beim Durchgang durch die katalytische Zone des Reaktors bis zum Ausstoß des Styrols schnell einzuschätzen und die Flugbahn der Änderungen der Werte der Steueraktionen bis zu einem bestimmten Zeitpunkt - dem Steuerhorizont – zu berechnen.

Synthèse de la structure du modèle prédictif du système de la gestion du réacteur de la déshydrogénation de l'éthylène-benzène

Résumé: Est réalisée une synthèse de la structure générale de l'assurance mathématique du système de commande proactive de l'unité de réacteur de la production de styrène. Sont mis au point la description mathématique des transformations chimiques et le modèle des processus d'échange de chaleur au cours de la première phase de déshydrogénation. A la base de l'expérience de calcul, sont obtenus et affichés les résultats de l'étude de la dynamique de la première étape de la réaction sous la forme des diagrammes de la variation de la concentration de styrène en fonction des valeurs des paramètres technologiques. Les résultats numériques de la modélisation permettent d'évaluer rapidement l'effet de la diminution de la température du mélange lors du passage de la zone catalytique du réacteur sur la grandeur de la sortie du styrène et le calcule la trajectoire de la variation des valeurs gérant la commande jusqu'à un certain moment du temps – l'horizon de commande.

Авторы: *Тихомиров Сергей Германович* – доктор технических наук, профессор кафедры информационных и управляющих систем, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»; *Подвальный Семен Леонидович* – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных и вычислительных систем, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; *Попов Алексей Петрович* – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры информационных и управляющих систем, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»; *Неизвестный Олег Геннадьевич* – аспирант кафедры автоматизированных и вычислительных систем, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия.

Рецензент: *Карпушкин Сергей Викторович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОТОБРАЖЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ ДВУМЕРНЫХ ЗАДАЧ СТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

П. А. Алехин, А. О. Глебов, С. В. Карпов,
С. В. Карпушкин, В. А. Хлебников

*Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; scitech@mail.tstu.ru*

Ключевые слова: изоконтур; стационарная теплопроводность; топологическая оптимизация; электроэрозионная резка.

Аннотация: Топологическая оптимизация (ТО) может быть применена для поиска оптимального распределения материала внутри рассматриваемой области. Изготовление оптимизированных таким образом изделий связано с необходимостью перехода от графического представления распределения материала к стандартам систем автоматизированного проектирования, автоматизации инженерных расчетов и технологической подготовки производства. В связи с этим существует потребность в надежных, универсальных и доступных методах, позволяющих осуществить геометрическое отображение результатов ТО.

Рассмотрена одна из классических задач ТО – задача стационарной теплопроводности плоской металлической пластины с условием Дирихле на одной из границ, на примере которой разработан алгоритм отображения результатов ТО, предусматривающий построение и анализ изоконтуров распределения материала в расчетной области. Показано, что для тепловых задач возникает необходимость фильтрации результатов и проведения процедуры сглаживания. Выявлены особенности постобработки сплайнов.

Разработанный алгоритм протестирован на примере изготовления радиатора охлаждения из дюралюминия при помощи технологии проволоочной электроэрозионной резки.

Введение

Топологическая оптимизация (ТО) технических систем – широко распространенный метод, обеспечивающий значительное снижение материалоемкости и энергопотребления. В общем случае это инструмент, основанный на совместном использовании численного анализа методом конечных элементов (МКЭ) и градиентных методов оптимизации для нахождения распределения материала, обеспечивающего экстремум отклика объекта исследования на заданные условия функционирования [1]. Впервые такой подход был применен к задачам анализа напряженно-деформированного состояния конструкций, позже сфера применения расширилась до микроэлектромеханических систем, фотоники, акустики, механики жидкости и др. Для топологической оптимизации наиболее популярны SIMP-метод [2] и метод гомогенизации [3], идея которых состоит в том, что параметры элементов расчетной системы являются варьируемыми переменными. При этом реализация процедуры оптимизации предусматривает установление отношений между локальными свойствами материала (например, плотностью) и глобальными физическими свойствами (например, модулем Юнга или теплопроводностью).

Далее на основе выбранного метода оптимизации происходит итерационное перераспределение материала внутри расчетной области.

Поскольку задачи ТО предусматривают большое число варьируемых переменных, для их решения необходимо использование специальных методов оптимизации. Наиболее часто в данных случаях используется метод подвижных асимптот (Method of Moving Asymptotes – **ММА**), который впервые был предложен Сванбергом [4], а затем развит им же в работе [5]. Детальное исследование использования ММА представлено в работе [6].

Методология ТО успешно используется при конструировании новых технических систем, обеспечивая уменьшение капитальных и эксплуатационных затрат при выполнении широкого спектра ограничений. Однако в большинстве случаев такие конструкции можно считать лишь концептом ввиду необходимости проведения постобработки результатов. Эти «доработки» геометрии во многих случаях могут сильно повлиять на эффективность конструкции, в том числе и негативно [7]. Как отмечено в [8], существует потребность в надежных и доступных методах, позволяющих осуществить геометрическое отображение результатов ТО для проведения конечно-элементного анализа. Данный вопрос рассмотрен в настоящей работе.

О необходимости проведения операций постобработки результатов ТО заявлено, например, в [9] (рис. 1), где предлагается не только простое отображение полученных результатов в данные о геометрии, но и учет аспектов изготовления и практического использования созданных конструкций [10]. Последние исследования сделали возможным в некоторых случаях реализацию ТО без постобработки результатов [7]. Например, возможно внесение в постановку задачи ТО ограничений, отражающих особенности технологического процесса изготовления, что гарантирует возможность изготовления рассматриваемых изделий заявленным способом. В некоторых случаях это влияет на стадию подготовки технологического оборудования, например, можно исключить необходимость оптической коррекции фотолитографического оборудования. Тем не менее, даже в данных случаях, для конечного изготовления физических образцов необходима информация о геометрии в виде САД-файлов, поэтому задача геометрического отображения результатов ТО является актуальной.

В работе [11] использован свободно распространяемый графический редактор InkSkape для создания точных векторных отображений результатов ТО стационарной теплопроводности. Однако не приведено никакой информации о непосредственной процедуре извлечения геометрических данных.

Известны работы, посвященные извлечению геометрических данных для трехмерных задач [12]. Разработанный алгоритм состоял из трех этапов: определение замкнутых геометрических изоповерхностей для генерации оптимизированных моделей и их характерных особенностей, а также создание параметрической твердотельной САД-модели, представляющей собой поверхностные полиномы восьмой степени. Одним из недостатков трехмерной постановки является требовательность к вычислительным ресурсам [10].

Оптимизированные конструкции в тепловых задачах имеют комплексную геометрию, схожую с дендрическими структурами. Они могут быть изготовлены при помощи аддитивных технологий (**АТ**), а в случаях, когда изготовление образцов предусматривает обра-

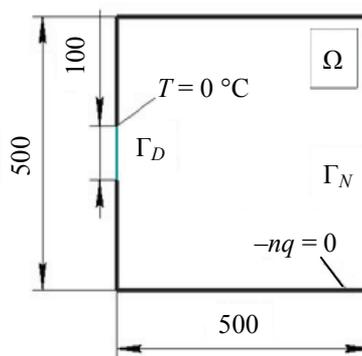


Рис. 1. Геометрия расчетной системы и используемые граничные условия

ботку листовых материалов (например, лазерную резку полимерных и металлических материалов), возможна постановка двумерных задач и получение достаточно точных решений за разумное время.

Проблема больших вычислительных затрат является характерной для процедур ТО. Например, в работе [10] задействован высокопроизводительный вычислительный кластер для решения задачи стационарной теплопроводности радиаторов пассивного охлаждения осветительных светодиодных устройств. Алгоритм оптимизации предусматривал проведение 500 – 1000 итераций, что потребовало от 2 до 5 суток машинного времени с использованием 1000 – 2500 ядер кластера. С учетом этого, задача была рассмотрена в двумерной постановке.

Постановка и решение задачи

В качестве объекта исследования выбрана классическая задача, встречающаяся в научной литературе: ТО стационарной теплопроводности плоской металлической пластины [13] (см. рис. 1).

Такая задача является актуальной, например, для электронных устройств, когда важно обеспечивать заданный температурный режим функционирования компонентов за счет стока тепла через радиатор. В рассматриваемой изотропной расчетной области Ω осуществляется равномерное внутреннее тепловыделение Q . Температура расположенной посередине левой границы Γ_D шириной 100 мм принималась равной 0 °С. На остальных границах Γ_N теплообмен отсутствовал (условие Неймана). Стационарная теплопроводность в расчетной области описывается следующими уравнениями:

$$\nabla(k\nabla T) + Q = 0, (x, y) \in \Omega; \quad (1)$$

$$T = 0, (x, y) \in \Gamma_D; \quad (2)$$

$$(k\nabla T)n = 0, (x, y) \in \Gamma_N, \quad (3)$$

где $T = T(x, y)$ – температурное поле в точке с координатами (x, y) внутри Ω ; k – коэффициент теплопроводности материала пластины. Задача состоит в минимизации средней температуры пластины $T_{\text{ср}}$ при наличии ограничений на массу $m \leq m_{\text{п}}$. Для снижения вычислительных затрат рассматривается только тепловая задача, хотя в некоторых публикациях показаны мультифизические процессы [14].

Дискретизация расчетной области осуществлялась двумерными прямоугольными конечными элементами (КЭ). Результаты предыдущих работ показали, что для задачи данной размерности дискретизация расчетной области при значении максимального размера единичного элемента $\delta = 4$ мм является оптимальной. Постановка задачи предусматривает использование модели твердого изотропного тела с пенализацией SIMP [15]. В качестве метода оптимизации использован ММА [5], применяющий анализ чувствительности целевой функции к варьируемым переменным. С математической точки зрения получение лучшего значения целевой функции возможно за счет усложнения топологии материала. Однако, как показано в [16], реализация подобных сложных структур не всегда приводит к улучшению результатов: значение целевой функции может ухудшаться при использовании избыточной степени детализации [17].

В результате решения задачи (1) – (3) получено распределение материала (рис. 2, а) с представлением данных в цветовой карте в градациях серого. Черный цвет означает присутствие материала, белый – отсутствие. Серый цвет соответствует промежуточной плотности.

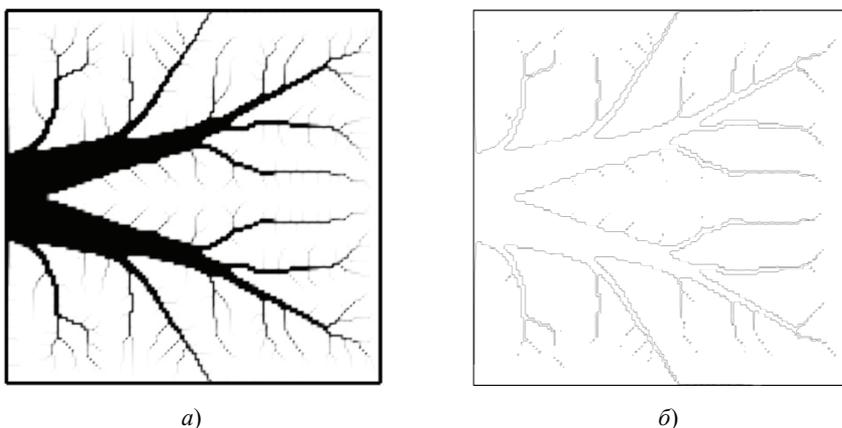


Рис. 2. Результат решения задачи ТО стационарной теплопроводности плоской металлической пластины:

a – распределение материала; *б* – контурный график распределения материала

Такой результат хорошо согласуется с данными, полученными в [11, 18]. Задачей исследования является извлечение данных о геометрии для последующего использования в CAD/CAE/CAM-системах. То есть необходимо построить замкнутый контур, соответствующий границе материала. Для этого можно представить результаты в виде контурного графика (рис. 2, б).

Обработка результатов

Согласно постановке задачи ТО с применением SIMP-модели, варьируемой переменной является плотность каждого КЭ. Поэтому необходимо регистрировать информацию о точном расположении каждого элемента. В связи с этим для однозначного определения всех узлов необходимо осуществить регистрацию следующих величин: двух координат КЭ, информацию о КЭ, значения функции для КЭ. Поэтому целесообразно осуществлять импорт геометрии в текстовый файл, содержащий соответственно 4 столбца с данными. Следует отметить, что такой файл содержит точную информацию об используемой расчетной сетке, что позволит в конечном итоге построить замкнутый контур.

Особенности постобработки

Реализация методов ТО возможна во многих современных CAE-системах (например, SiemensNX [19], ANSYS [20]), а также пакетах прикладных программ (например, MATLAB [21]). Поэтому постобработка полученных результатов может быть выполнена встроенными средствами этих программ, а также любыми способами обработки двумерных массивов.

Полученный ранее контурный график (см. рис. 2, б) необходимо импортировать в виде многоточечного сплайна в текстовый файл. Из-за большого числа узлов сплайн может иметь мелкие участки с множеством точек перегиба (рис. 3, а). В этом случае к данному сплайну можно применить операции сглаживания [22].

Параметром настройки данной операции может являться величина относительного допуска: чем он выше, тем ровнее получаемый контур (рис. 3, б). Этот параметр представляет собой максимальное расстояние между генерируемой кривой и последовательностью узловых точек. Значение «0» будет обеспечивать интерполяцию всех точек.

Для результатов, представленных на рис. 3, проведен расчет площади контуров, который показал, что данные области практически не отличаются друг от друга.

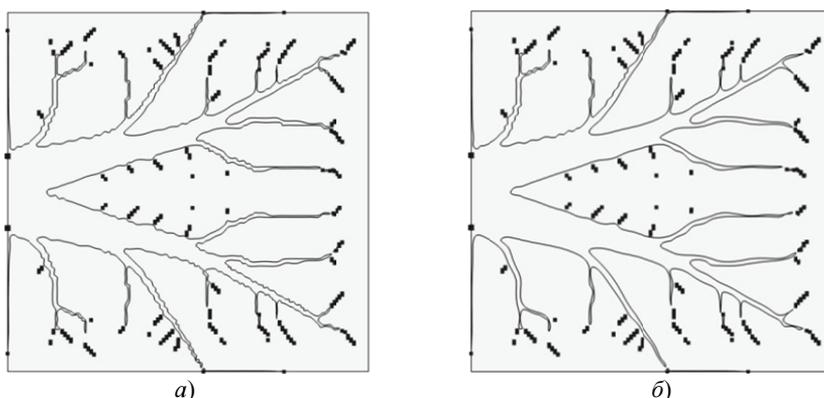


Рис. 3. Результат импорта геометрии в виде сплайна при различных значениях сглаживания:
 $a - 0,004$ мм; $b - 0,007$ мм

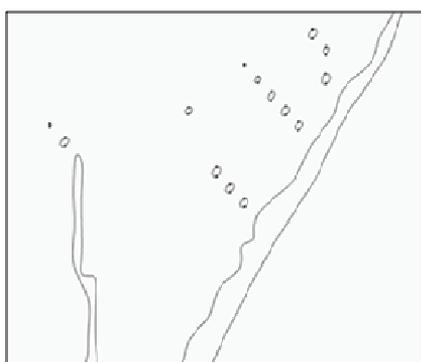


Рис. 4. Области, не принадлежащие основному замкнутому контуру

Визуальный анализ контуров, представленных на рис. 3, позволяет выделить многочисленные мелкие области, «оторванные» от основного контура (рис. 4).

Отметим, что оптимальная топология для задач стационарной теплопроводности имеет сходство с развитой дендрической структурой. В связи с этим при обработке сплайнов распределения материала получение таких областей, не имеющих физического смысла, неизбежно. Поэтому для корректного отображения результатов необходима фильтрация результатов, заключающаяся в удалении областей, не принадлежащих основному контуру.

Особенности постобработки для CAE-систем

Полученные после фильтрации сплайны можно использовать для дальнейшего КЭ-анализа. Однако встречаются ситуации, когда в этих областях КЭ-сетку построить невозможно. Основываясь на собственном практическом опыте, выделим две причины таких ситуаций. Первая – наличие самопересечения импортированного контура (рис. 5, *а*), вторая – присутствие «узких» мест, не позволяющих осуществить КЭ-дискретизацию рассматриваемой области (рис. 5, *б*).

В данном случае целесообразно проведение сглаживания для другого значения параметра. Например, на рис. 6, *а*, приведен контур, для которого возможно построение расчетной КЭ-сетки (рис. 6, *б*) при значении параметра сглаживания 0,0019 мм.

Число треугольных КЭ составило 34 708. Среднее качество элементов 0,79, минимальное 0,04.

Разработка алгоритма

Учитывая вышесказанное, можно предложить алгоритм отображения результатов двумерной ТО, представленный на рис. 7. На первом этапе на основе поверхности распределения материала строится изоконтур плотности. Далее осуществляется импорт данных изолинии в текстовый файл. На следующем этапе

текстовый файл импортируется в CAD/CAM-систему и осуществляется фильтрация данных. Полученный замкнутый сплайн используется для задания нагрузок и граничных условий (САЕ) или траектории движения рабочих органов промышленного оборудования (САМ). Если это оказывается невозможным из-за присутствия самопересечений и «узких» мест, то осуществляется операция сглаживания контура с возрастающим значением относительного допуска.

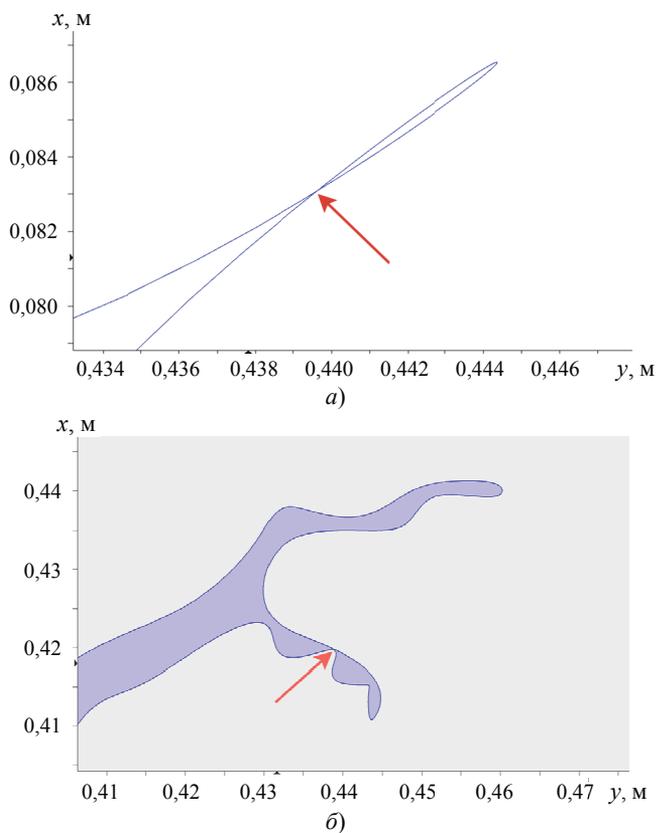


Рис. 5. Характерные случаи непригодности импортированной геометрии для реализации КЭ-анализа:

a – самопересечение контура; *б* – наличие «узких» мест

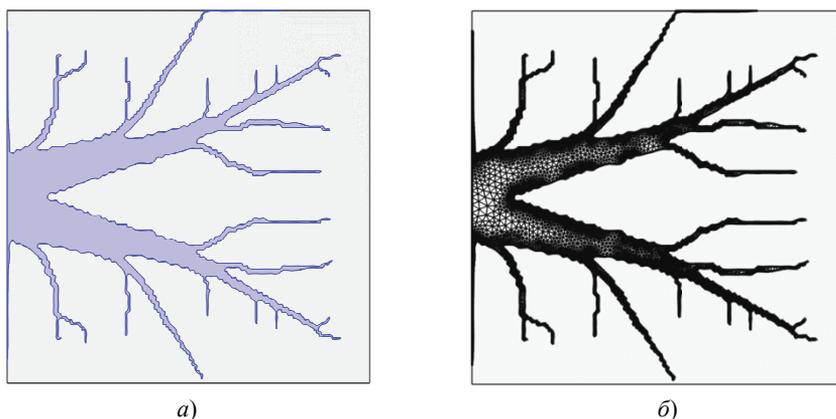


Рис. 6. Расчетная область после процедуры фильтрации (а) и КЭ-сетка расчетной области (б)

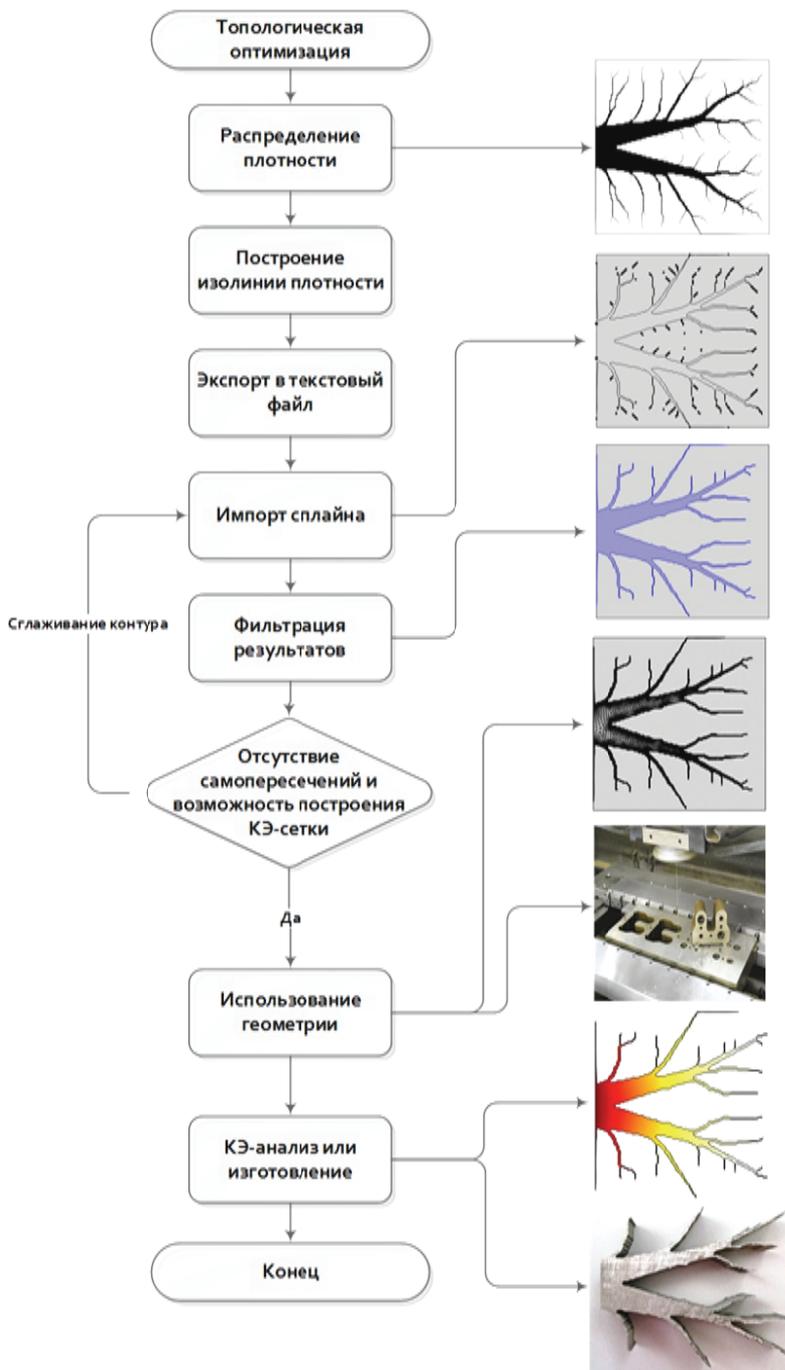


Рис. 7. Алгоритм отображения результатов ТО

Изготовление опытного образца

В качестве технологии изготовления экспериментального образца выбрана проволочная электроэрозионная резка (Wire Electrical Discharge Machining – **WEDM**). Данная технология эффективна при изготовлении образцов из твердых металлических материалов, имеющих сложную геометрию [23].



Рис. 8. Схема изготовления образца по технологии WEDM

Полученный на основе предложенного алгоритма замкнутый контур в формате .dxf импортирован в систему программного управления электроэрозионным проволочно-вырезным станком (ЭПВС) AutoCut. Пользователь задает технические параметры ЭПВС, а также осуществляет проектирование процесса резки на основании геометрии контура. Во время работы станка система контролирует скорость двигателя и параметры импульсной мощности. Метод обработки базируется на графическом процессоре и представляет собой объединенное использование CAD и CAM. Схема изготовления образца представлена на рис. 8.



Рис. 9. Внешний вид изготовленного образца

Для изготовления экспериментального образца использован ЭПВС с ЧПУ DK7732CA. Согласно спецификации, точность обработки составила $(6...9) \cdot 10^{-6}$ м. В качестве заготовки использована пластина из дюралюминия Д16 100×100×20 мм. Время изготовления составило около 10 часов.

Опорная поверхность радиатора должна быть отшлифована для уменьшения термосопротивления. Совместный анализ рис. 6, а, и 9 позволяет сделать вывод, что из-за технологических ограничений электроэрозионной резки геометрия изготовленного образца не содержит узких областей. Однако для основного контура образца точность и разрешение данной технологии являются удовлетворительными.

Выводы

Рассмотрена задача ТО плоской металлической пластины с условием Дирихле на одной из границ. Найденное распределение материала хорошо согласуется с результатами, полученными в предыдущих работах по ТО.

Практическое применение полученных результатов возможно при их представлении по стандартам систем CAD/CAE/CAM. Для этих целей разработан алгоритм геометрического отображения результатов ТО. На основе имитационного моделирования задач стационарной теплопроводности выявлены особенности постобработки результатов. Показано, что для данных задач возникает необходимость фильтрации и проведения процедуры сглаживания контуров.

Разработанный алгоритм отображения результатов двумерной ТО реализован при помощи встроенных инструментов COMSOL Multiphysics. Необходимо отметить возможность создания прикладных комплексов программ для решения этой задачи в автоматизированном режиме.

Результаты решения задачи использованы для создания графической схемы распределения материала с последующим импортом в системы подготовки управляющих программ оборудования на основе ЧПУ. Для тестирования алгоритма выбрана современная технология WEDM. Точность и разрешение данной технологии являются удовлетворительными для промышленного изготовления.

Работа [24] посвящена экспериментальным и численным исследованиям эффективности топологически оптимизированных конструкций пассивного охлаждения светодиодных устройств. Экспериментальные образцы изготавливались по современной АТ селективного лазерного спекания [25], а также с использованием традиционных технологий обработки металлов резанием. Отмечено, что применение АТ в этом случае на два порядка дороже традиционных технологий. В связи с этим можно сделать вывод, что использование технологии WEDM является предпочтительным. Тем не менее использование АТ оправдано в тех случаях, когда речь идет об уникальных конструкциях и прототипах, где требуется наилучшая эффективность функционирования.

Область применения данного алгоритма – двумерные задачи ТО, результат решения которых являются сложные картины распределения материала. Под «сложными» можно понимать такие картины, конструкторская проработка которых, в целях повышения технологичности изготовления (например, замена криволинейных контуров прямолинейными), неизбежно приведет к уменьшению эффективности изготавливаемых изделий. Такими задачами являются ТО процессов теплопроводности (в том числе сопряженной с конвекцией) и гидродинамики. К задачам ТО напряженно-деформированного состояния это относится в меньшей степени.

Существует большое число исследований ТО в задачах теплопроводности в двумерной и трехмерной постановках, например, работа [26] с обзором статей, посвященных различным задачам ТО теплопроводности и описанию применяемых в них методов. Особенность данных публикаций – фундаментальный характер исследований, то есть в большинстве случаев отсутствует экспериментальное обоснование полученных теоретических результатов. В связи с этим поставлена задача проведения прикладных исследований для проверки и оценки степени эффективности оптимизированных конструкций пассивного охлаждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части проекта № 8.7082.2017/8.9 с использованием оборудования центра коллективного пользования «Цифровое машиностроение» Тамбовского государственного технического университета.

Список литературы

1. Gersborg-Hansen, A. Topology Optimization of Heat Conduction Problems Using the finite Volume Method / A. Gersborg-Hansen, M. P. Bendsøe, O. Sigmund // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2006. – Vol. 31, Issue 4. – P. 251 – 259.
2. Bendsøe, M. Ph. Optimal Shape Design as a Material Distribution Problem / M. Ph. Bendsøe // Structural optimization. – 1989. – Vol. 1, Issue 4. – P. 193 – 202.
3. Bendsøe, M. Ph. Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenisation Method / M. Ph. Bendsøe, N. Kikuchi // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. – 1988. – Vol. 71, Issue 2. – P. 197 – 224.
4. Svanberg, K. The Method of Moving Asymptotes – A New Method for Structural Optimization / K. Svanberg // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 1987. – Vol. 24, Issue 2. – P. 359 – 373. doi: 10.1002/nme.1620240207

5. Svanberg, K. A Class of Globally Convergent Optimization Methods Based on Conservative Convex Separable Approximations / K. Svanberg // *SIAM Journal on Optimization*. – 2002. – Vol. 12, Issue 2. – P. 555 – 573. doi: 10.1137/S1052623499362822
6. Dbouk, T. Performance of Optimization Algorithms Applied to Large Nonlinear Constrained Problems / T. Dbouk, J.-L. Harion // *American Journal of Algorithms and Computing*. – 2015. – Vol. 2, No. 1. – P. 32 – 56. doi:10.7726/ajac.2015.1003
7. Lazarov, B. S. Length Scale and Manufacturability in Density-Based Topology Optimization / B. S. Lazarov, F. Wang, O. Sigmund // *Archive of Applied Mechanics*. – 2016. – Vol. 86, No. 1-2. – P. 189 – 218. doi: 10.1007/s00419-015-1106-4
8. A Geometry Projection Method for Shape Optimization / J. Norato [et al.] // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. – 2004. – Vol. 60, Issue 14. – P. 2289 – 2312. doi: 10.1002/nme.1044
9. Development of Heat Sink Device by Using Topology Optimization / A. A. Koga [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2013. – Vol. 64. – P. 759 – 772. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.05.007
10. Design of Passive Coolers for Light-Emitting Diode Lamps Using Topology Optimisation / J. Alexandersen [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – Vol. 122. – P. 138 – 149. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.103
11. Lohan, D. J. Topology Optimization for Heat Conduction Using Generative Design Algorithms / D. J. Lohan, E. M. Dede, J. T. Allison // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. – 2017. – Vol. 55, Issue 3. – P. 1063 – 1077. doi: 10.1007/s00158-016-1563-6
12. Koguchi, A. A Surface Reconstruction Algorithm for Topology Optimization / A. Koguchi, N. Kikuchi // *Engineering with Computers*. – 2006. – Vol. 22, Issue 1. – P. 1 – 10. doi: 10.1007/s00366-006-0023-0
13. Bendsoe, M. Ph. *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications* / M. Ph. Bendsoe, O. Sigmund. – Springer Science & Business Media, 2013. – 370 p.
14. Topological Design of Structures and Composite Materials with Multiobjectives / N. De Kruijf [et al.] // *International Journal of Solids and Structural*. – 2007. – Vol. 44, Issue 22-23. – P. 7092 – 7109. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2007.03.028
15. Rozvany, G. I. N. Generalized Shape Optimization Without Homogenization / G. I. N. Rozvany, M. Zhou, T. Birker // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. – 1992. – Vol. 4, Issue 3-4. – P. 250 – 252. doi: 10.1007/BF01742754
16. Ghodoossi, L. Conceptual Study on Constructal Theory / L. Ghodoossi // *Energy Conversion and Management*. – 2004. – Vol. 45, Issue 9-10. – P. 1379 – 1395. doi: 10.1016/j.enconman.2003.09.002
17. Zhang, Y. Design of Conducting Paths Based on Topology Optimization / Y. Zhang, Sh. Liu // *Heat and Mass Transfer*. – 2008. – Vol. 44, Issue 10. – P. 1217 – 1227. doi: 10.1007/s00231-007-0365-1
18. Dede, E. M. Topology Optimization, Additive Layer Manufacturing, and Experimental Testing of an Air-Cooled Heat Sink / E. M. Dede, Sh. N. Joshi, F. Zhou // *Journal of Mechanical Design*. – 2015. – Vol. 137. – P. 111702-1 – 111702-9. doi: 10.1115/1.4030989
19. Design and Topology Optimization of Lattice Structures Using Deformable Implicit Surfaces for Additive Manufacturing / E. B. Arisoy [et al.] // *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference : volume 4 : 20th Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference ; 9th International Conference on Micro- and Nanosystems (2 – 5 August, 2015, Boston, Massachusetts, USA)*. – ASME, 2015. – P. V004T05A003. doi: 10.1115/DETC2015-46565

20. Finite Element Analysis of the Lumbar Spine with a New Cage Using a Topology Optimization Method / Zh.-Ch. Zhong [et al.] // *Medical Engineering and Physics*. – 2006. – Vol. 28, Issue 1. – P. 90 – 98. doi: 10.1016/j.medengphy.2005.03.007
21. Sigmund, O. A 99 Line Topology Optimization Code Written in MATLAB / O. Sigmund // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. – 2001. – Vol. 21, Issue 2. – P. 120 – 127. doi: 10.1007/s001580050176
22. De Boor, C. R. A Practical Guide to Splines / C. R. de Boor. – New York : Springer-Verlag, 1978. – 325 p.
23. Firouzabadi, H. A. Improving Accuracy of Curved Corners in Wire EDM Successive Cutting / H. A. Firouzabadi, J. Parvizian, A. I. Abdullah // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2015. – Vol. 76, Issue 1-4. – P. 447 – 459. doi: 10.1007/s00170-014-6270-0
24. Experimental Validation of Additively Manufactured Optimized Shapes for Passive Cooling / B. S. Lazarov [et al.] // *Applied Energy*. – 2018. – Vol. 226. – P. 330 – 339. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.05.106
25. Pat. US4863538A USA, NKI C23C26/02. Method and Apparatus for Producing Parts by Selective Sintering / Deckard C. R. – Publish. 1986.
26. Dbouk, T. A Review About the Engineering Design of optimal Heat Transfer Systems Using Topology Optimization / T. Dbouk // *Applied Thermal Engineering*. – 2017. – Vol. 112. – P. 841 – 854. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.10.134

Development of an Algorithm for Displaying the Topological Optimization Results in Two-Dimensional Problems of Stationary Heat Conduction

P. A. Alekhin, A. O. Glebov, S. V. Karpov,
S. V. Karpushkin, V. A. Khlebnikov

*Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering,
TSTU, Tambov, Russia; scitech@mail.tstu.ru*

Keywords: isocontours; stationary thermal conductivity; topological optimization; electroerosion cutting.

Abstract: Topological optimization (TO) can be applied to search for the optimal distribution of material within the area under consideration. The manufacture of products optimized in this way is associated with the need to move from a graphic representation of the distribution of the material to the standards of computer-aided design (CAD), computer-aided engineering (CAE) and computer-aided manufacturing (CAM).

In this regard, there is a need for reliable, universal and affordable methods that allow for the geometric display of the results of TO.

We considered one of the classical maintenance problems – the problem of stationary heat conduction of a flat metal plate with the Dirichlet condition on one of the boundaries. Using the example of this problem, an algorithm has been developed for displaying the results of maintenance, providing for the construction and analysis of the material distribution isocontours in the computational domain. For thermal problems there is a need to filter the results and carry out the smoothing procedure. The peculiarities of spline post-processing are revealed.

The developed algorithm was tested on the example of manufacturing a radiator for cooling from duralumin using wire EDM technology.

References

1. Gersborg-Hansen A., Bendsøe M.Ph., Sigmund O. Topology Optimization of Heat Conduction Problems Using the finite Volume Method, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2006, vol. 31, issue 4, pp. 251-259.
2. Bendsøe M.Ph. Optimal Shape Design as a Material Distribution Problem, *Structural Optimization*, 1989, vol. 1, issue 4, pp. 193-202.
3. Bendsøe M.Ph., Kikuchi N. Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenisation Method, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 1988, vol. 71, issue 2, pp. 197-224.
4. Svanberg K. The Method of Moving Asymptotes – a New Method for Structural Optimization, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1987, vol. 24, issue 2, pp. 359-373, doi: 10.1002/nme.1620240207
5. Svanberg K.A Class of Globally Convergent Optimization Methods Based on Conservative Convex Separable Approximations, *SIAM Journal on Optimization*, 2002, vol. 12, issue 2, pp. 555-573. doi: 10.1137/S1052623499362822
6. Dbouk T., Harion J.-L. Performance of Optimization Algorithms Applied to Large Nonlinear Constrained Problems, *American Journal of Algorithms and Computing*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 32-56, doi:10.7726/ajac.2015.1003
7. Lazarov B.S., Wang F., Sigmund O. Length Scale and Manufacturability in Density-Based Topology Optimization, *Archive of Applied Mechanics*, 2016, vol. 86, no. 1-2, pp. 189-218, doi: 10.1007/s00419-015-1106-4
8. Norato J., Robert B.H., Tortorelli D.A., Bendsøe M.Ph. A Geometry Projection Method for Shape Optimization, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004, vol. 60, issue 14, pp. 2289-2312, doi: 10.1002/nme.1044
9. Koga A.A., Lopes E.C.C., Nova H.V., de Lima C.R. Development of Heat Sink Device by Using Topology Optimization, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, vol. 64, pp. 759-772, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.05.007
10. Alexandersen J., Sigmund O., Meyer K.E., Lazarov B.S. Design of Passive Coolers for Light-Emitting Diode Lamps Using Topology Optimisation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 122, pp. 138-149, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.103
11. Lohan D.J., Dede E.M., Allison J.T. Topology Optimization for Heat Conduction Using Generative Design Algorithms, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2017, vol. 55, issue 3, pp. 1063-1077, doi: 10.1007/s00158-016-1563-6
12. Koguchi A., Kikuchi N. A Surface Reconstruction Algorithm for Topology Optimization, *Engineering with Computers*, 2006, vol. 22, issue 1, pp. 1-10, doi: 10.1007/s00366-006-0023-0
13. Bendsøe M.Ph., Sigmund O. Topology Optimization: Theory, Methods and Applications, *Springer Science & Business Media*, 2013, 370 p.
14. De Kruijf N., Zho S., Li Q., Mai Y.-W. Topological Design of Structures and Composite Materials with Multiobjectives, *International Journal of Solids and Structural*, 2007, vol. 44, issue 22-23, pp. 7092-7109, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2007.03.028
15. Rozvany G.I. N., Zhou M., Birker T. Generalized Shape Optimization Without Homogenization, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 1992, vol. 4, issue 3-4, pp. 250-252, doi: 10.1007/BF01742754
16. Ghodoossi L. Conceptual Study on Constructal Theory, *Energy Conversion and Management*, 2004, vol. 45, issue 9-10, pp. 1379-1395, doi: 10.1016/j.enconman.2003.09.002
17. Zhang Y., Liu Sh. Design of Conducting Paths Based on Topology Optimization, *Heat and Mass Transfer*, 2008, vol. 44, issue 10, pp. 1217-1227, doi: 10.1007/s00231-007-0365-1

18. Dede E.M., Joshi Sh.N., Zhou F. Topology Optimization, Additive Layer Manufacturing, and Experimental Testing of an Air-Cooled Heat Sink, *Journal of Mechanical Design*, 2015, vol. 137, pp. 111702-1–111702-9, doi: 10.1115/1.4030989
19. Arisoy E.B., Musuvathy S., Mirabella L., Slavin E. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference: vol. 4: 20th Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference; 9th International Conference on Micro- and Nanosystems*, 2-5 August, 2015, Boston, Massachusetts, USA, ASME, 2015, p. V004T05A003, doi: 10.1115/DETC2015-46565
20. Zhong Zh.-Ch., Wei Sh.-H., Wang J.-P., Feng Ch.-K., Chen Ch.-Sh., Yu Ch.-H. Finite Element Analysis of the Lumbar Spine with a New Cage Using a Topology Optimization Method, *Medical Engineering and Physics*, 2006, vol. 28, issue 1, pp. 90-98, doi: 10.1016/j.medengphy.2005.03.007
21. Sigmund O. A 99 Line Topology Optimization Code Written in MATLAB, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2001, vol. 21, issue 2, pp. 120-127, doi: 10.1007/s001580050176
22. De Boor C.R. A Practical Guide to Splines, New York: Springer-Verlag, 1978, 325 p.
23. Firouzabadi H.A., Parvizian J., Abdullah A.I. Improving Accuracy of Curved Corners in Wire EDM Successive Cutting, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 76, issue 1-4, pp. 447-459, doi: 10.1007/s00170-014-6270-0
24. Lazarov B.S., Sigmund O., Meyer K.E., Alexandersen J. Experimental Validation of Additively Manufactured Optimized Shapes for Passive Cooling, *Applied Energy*, 2018, vol. 226, pp. 330-339, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.05.106
25. Deckard C.R. Method and Apparatus for Producing Parts by Selective Sintering, USA, 1986, pat. US4863538A.
26. Dbouk T. A Review About the Engineering Design of optimal Heat Transfer Systems Using Topology Optimization, *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 112, pp. 841-854, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.10.134

Entwicklung des Algorithmus zur Anzeige der Ergebnisse der topologischen Optimierung beim Lösen zweidimensionaler Aufgaben der stationären Wärmeleitung

Zusammenfassung: Die Topologische Optimierung (TO) kann verwendet werden, um eine optimale Materialverteilung innerhalb des betreffenden Bereichs zu finden. Die Herstellung von auf diese Weise optimierten Produkten ist mit der Notwendigkeit verbunden, von einer grafischen Darstellung der Verteilung des Materials zu CAD-Standards, Automatisierungstechnik-Berechnungen (CAE) und technologischer Produktionsvorbereitung (CAM) überzugehen. Im Zusammenhang damit besteht ein Bedarf an zuverlässigen, universellen und verfügbaren Methoden, die eine geometrische Darstellung der Ergebnisse von TO ermöglichen.

Es ist eines der klassischen Probleme der TO betrachtet: das Problem der stationären Wärmeleitung einer flachen Metallplatte mit der Dirichlet-Bedingung an einer der Grenzen. Am Beispiel dieser Aufgabe ist ein Algorithmus zur Anzeige der Instandhaltungsergebnisse entwickelt, der die Erstellung und Analyse von Isokonturen der Materialverteilung im berechneten Bereich vorsieht. Es ist gezeigt, dass für thermische Aufgaben die Notwendigkeit besteht, die Ergebnisse zu filtern und das Verfahren zu glätten. Merkmale der Nachbearbeitung von Splines sind identifiziert.

Der entwickelte Algorithmus wurde am Beispiel der Herstellung des Kühlkörpers aus Duraluminium mit Hilfe der Drahtelektroerosionstechnologie getestet.

Elaboration d'un algorithme d'affichage des résultats de l'optimisation topologique lors de la résolution des problèmes bidimensionnels de la conductivité thermique stationnaire

Résumé: L'optimisation topologique (OT) peut être appliquée pour la recherche de la distribution optimale du matériel à l'intérieur de la zone examinée. La fabrication de produits optimisés de la telle manière est liée à la nécessité du transfert de la représentation graphique du matériel aux normes de la conception assistée par ordinateur (CAO), de l'automatisation des calculs d'Ingénierie (ACI) et de la formation technologique de la production (FTP). Sont examinées les méthodes permettant de réaliser l'affichage géométrique des résultats.

L'une des tâches classiques de OT est considérée: celle de la conductivité thermique stationnaire de la plaque métallique plate avec la condition de Dirichlé à l'une des limites. Est mis au point un algorithme d'affichage des résultats pour la construction et l'analyse des isocontages de la séparation des matériaux dans la zone de calcul. Il est montré que pour les tâches thermiques, il est nécessaire de filtrer les résultats et d'effectuer une procédure de lissage. Sont identifiées les caractéristiques du post-traitement des splines.

L'algorithme développé a été testé à l'exemple de la fabrication d'un radiateur de refroidissement en duraluminium à l'aide de la technologie de la coupe du fil électrique.

Авторы: *Алехин Павел Андреевич* – аспирант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Глебов Алексей Олегович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Карнов Сергей Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Карпушкин Сергей Викторович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Хлебников Вячеслав Андреевич* – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Туголуков Евгений Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ОДНОФОТОННОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ НА ВЕРОЯТНОСТЬ ОШИБОЧНОЙ РЕГИСТРАЦИИ ДАННЫХ АСИНХРОННЫХ КВАНТОВО-КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ КАНАЛОВ СВЯЗИ

А. М. Тимофеев

*Кафедра защиты информации, УО «Белорусский государственный университет
информатики и радиозлектроники», г. Минск, Республика Беларусь;
tamvks@mail.ru*

Ключевые слова: квантово-криптографический канал связи; мертвое время; счетчик фотонов.

Аннотация: Определены выражения для оценки вероятностей ошибочной регистрации двоичных данных квантово-криптографического канала связи, содержащего счетчик фотонов с мертвым временем продлевающегося типа. По результатам математического моделирования установлены зависимости вероятностей ошибочной регистрации данных на выходе канала связи от среднего времени однофотонной передачи символов «0» и «1», на основе которых обоснован выбор наименьшего среднего времени передачи одного бита (символа), обеспечивающего наименьшие потери передаваемой информации. Полученные результаты позволяют повысить достоверность определения несанкционированного доступа к информации, передаваемой по дискретному двоичному асинхронному однородному квантово-криптографическому каналу связи без памяти и со стиранием.

Введение

В последнее время широкое применение находят квантово-криптографические системы связи, которые обеспечивают абсолютную конфиденциальность передаваемой информации за счет использования маломощных оптических импульсов. Среднее число фотонов в каждом таком импульсе составляет не более десяти [1 – 3]. Однако современные квантово-криптографические системы связи не позволяют достигать высоких скоростей передачи данных вследствие достаточно большого числа ошибок при регистрации маломощных оптических импульсов [4]. Одной из причин этого является то, что для достижения высокой скорости передачи информации необходимо сокращать среднее время передачи одного бита (символа), а оно ограничено снизу, в частности, быстродействием приемного оборудования, в качестве которого достаточно часто применяют наиболее чувствительные приемные модули – счетчики фотонов [1, 3 – 7]. Для оценки быстродействия счетчика фотонов используют такой параметр, как длительность его мертвого времени – интервала времени, в течение которого счетчик фотонов не чувствителен к падающему на него оптическому излучению [8, 9]. На сегодняшний момент оценка влияния времени однофотонной передачи информации на вероятность ошибочной регистрации данных квантово-криптографических каналов связи, содержащих в качестве приемного модуля счетчик фотонов с мертвым временем, не выполнялась, это являлось целью данной работы.

Объект исследования – дискретный двоичный асинхронный однородный квантово-криптографический канал связи без памяти и со стиранием, в котором в качестве приемного модуля использовался счетчик фотонов с мертвым временем продлевающегося типа. Выбор в качестве объекта исследования такого канала связи объясняется тем, что в ряде случаев его использование оказывается более предпочтительным ввиду отсутствия дополнительных линий связи для передачи и приема синхроимпульсов [1]. Мертвым временем продлевающегося типа характеризуются счетчики фотонов на базе лавинных фотоприемников, включенных по схеме пассивного гашения лавины [10].

В проводимых исследованиях необходимо установить влияние среднего времени однофотонной передачи информации на потери передаваемой информации и вероятность ошибочной регистрации данных квантово-криптографических каналов связи.

Оценка вероятностей ошибочной регистрации данных

Вначале получим выражения для расчета вероятностей ошибочной регистрации символов «0» и «1», передаваемых по квантово-криптографическим каналам связи. Дальнейшие рассуждения будут основаны на том, что передача информации осуществляется с использованием дискретного двоичного асинхронного однородного квантово-криптографического канала связи без памяти и со стиранием, математическая модель которого может быть получена по методике, показанной в работе [11]. Всеми потерями информации, за исключением потерь в счетчике фотонов, пренебрегаем.

На основании выражений для оценки вероятности ошибочной регистрации данных и статистических распределений, полученных в работах [10 – 14], применительно к счетчикам фотонов с рассматриваемым типом мертвого времени запишем выражения для вероятностей ошибочной регистрации символов «0» и «1» соответственно:

$$P_{\text{ош}0} = 1 - \sum_{N=N_1}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]}{N!}, \quad (1)$$

$$P_{\text{ош}1} = \sum_{N=0}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]}{N!}, \quad (2)$$

где N_1 и N_2 – нижний и верхний пороговые уровни регистрации соответственно; n_t – средняя скорость счета темновых импульсов на выходе счетчика фотонов; n_{s0} и n_{s1} – средние скорости счета сигнальных импульсов на выходе счетчика фотонов при передаче символов «0» и «1» соответственно; Δt – среднее время однофотонной передачи; τ_d – средняя длительность мертвого времени продлевающегося типа.

Отметим, что для оценки мертвого времени продлевающегося типа используют среднее значение, так как его длительность зависит от интенсивности оптического излучения [10].

Темновые и сигнальные импульсы появляются на выходе счетчика фотонов соответственно в отсутствии оптического сигнала и в результате воздействия фотонов регистрируемого излучения [10, 11].

Нижний и верхний пороговые уровни регистрации – соответственно наименьшее и наибольшее число зарегистрированных на выходе счетчика фотонов импульсов, при котором делается вывод, что передан символ «0». При превышении зарегистрированных импульсов числа N_2 делается вывод, что передан символ «1», при регистрации импульсов в количестве, меньшем, чем N_1 , принимается решение, что символ отсутствует.

Выражения (1) и (2) получены из следующих соображений. При подаче на вход счетчика фотонов регистрируемого излучения на его выходе формируется смесь темновых и сигнальных импульсов. Статистические распределения этих импульсов при наличии на входе счетчика фотонов ослабленного оптического излучения соответствуют распределению Пуассона [10, 11] и определяют выбор нижнего и верхнего пороговых уровней регистрации N_1 и N_2 , по аналогии с выбором порогового уровня, приведенного в [14, 15]. Причем для рассматриваемого канала связи при передаче символов «0» и «1» используются оптические сигналы мощностью P_1 и P_2 ($P_1 < P_2$), которые транслируются в течение длительности времени Δt . Поскольку символы «0» и «1» передаются импульсами различной мощности, то на выходе счетчика фотонов за время Δt формируется различное число электрических импульсов, прямо пропорциональное мощности оптического излучения. Поэтому число импульсов, соответствующее символу «0», будет меньше, чем число импульсов, соответствующее символу «1».

Каждая из вероятностей $P_{\text{ош}0}$ и $P_{\text{ош}1}$ имеет две составляющие. Первая определяет вероятность того, что при приеме оптического излучения счетчиком фотонов будет зарегистрировано импульсов меньше, чем нижний пороговый уровень, а вторая составляющая для $P_{\text{ош}0}$ и $P_{\text{ош}1}$ соответственно – вероятность того, что при наличии на входе счетчика фотонов оптических сигналов мощностью P_1 и P_2 на его выходе будет зарегистрировано импульсов больше, чем верхний пороговый уровень, и в диапазоне $N_1 \dots N_2$. Вероятности регистрации символов «0» и «1» при наличии на входе канала связи символов «0» и «1» равны соответственно $(1 - P_{\text{ош}0})$ и $(1 - P_{\text{ош}1})$.

На основании представленных рассуждений можно сделать вывод, что выражения (1) и (2) пригодны для определения вероятностей ошибочной регистрации двоичных данных для рассматриваемого квантово-криптографического канала связи при соблюдении указанных выше ограничений.

Результаты моделирования и их обсуждение

Вычисления вероятностей ошибочной регистрации двоичных символов выполнялись для каналов связи, содержащих в качестве приемного модуля счетчик фотонов с мертвым временем продлевающегося типа при различных значениях τ_d , n_{s0} и n_{s1} .

На рисунке 1 представлены зависимости вероятностей ошибочной регистрации двоичных символов от среднего времени однофотонной передачи для различной средней длительности мертвого времени продлевающегося типа. Расчет проводился для одинаковых значений нижнего и верхнего пороговых уровней регистрации $N_1 = 1$ и $N_2 = 7$, средней скорости счета темновых импульсов $n_t = 10^3 \text{ с}^{-1}$ и среднем времени передачи одного бита (символа) $\tau_b = 100 \text{ мкс}$ как при исследовании зависимости $P_{\text{ош}0}(\Delta t)$, так и при исследовании зависимости $P_{\text{ош}1}(\Delta t)$. Необходимо отметить, что пороговые уровни регистрации можно выбирать и другими, отличными от 1 и 7, но при сравнении значений $P_{\text{ош}0}(\Delta t)$ и $P_{\text{ош}1}(\Delta t)$ для различных средних длительностей мертвого времени следует фиксировать N_1 и N_2 постоянными, как и среднее значение скорости счета темновых импульсов n_t и среднее время передачи одного бита (символа) τ_b . Диапазон значений Δt , на котором исследованы зависимости $P_{\text{ош}0}(\Delta t)$ и $P_{\text{ош}1}(\Delta t)$, выбирался от τ_d до $\tau_b/2$. Это объясняется тем, что τ_d не может превышать Δt , которое в свою очередь должно быть меньше средней длительности передачи одного бита (символа) τ_b на величину защитного временного интервала (см. [1]); в противном случае использование счетчиков фотонов для регистрации данных становится невозможным.

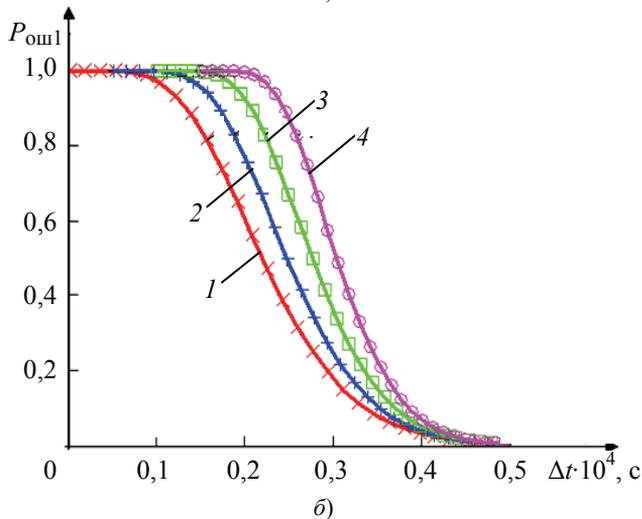
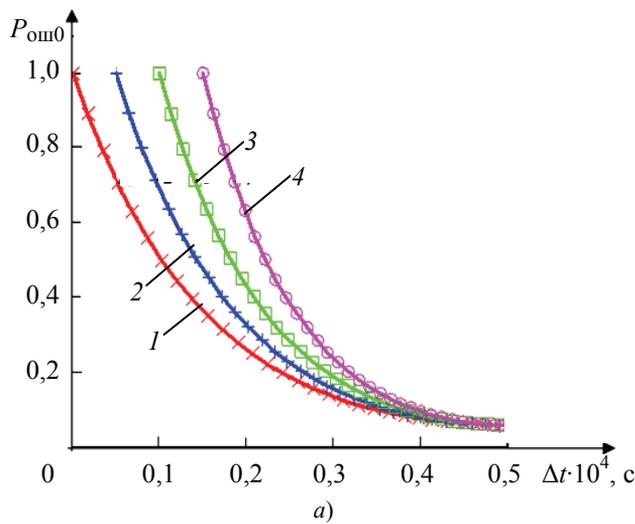


Рис. 1. Зависимости вероятностей ошибочной регистрации символов «0» (а) и «1» (б) от среднего времени однофотонной передачи при средней длительности мертвого времени τ_d :
 $1 - 0$ мкс; $2 - 5$ мкс; $3 - 10$ мкс; $4 - 15$ мкс

Следует отметить, что при расчете зависимостей, показанных на рис. 1, были выбраны оптимальные скорости счета сигнальных импульсов n_{s0} и n_{s1} из диапазона $0 \dots 0,5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$; критерий оптимальности – наименьшее значение скорости счета, при которой вероятность ошибочной регистрации двоичного символа минимальна. Указанный диапазон значений скоростей счета сигнальных импульсов выбран исходя из экспериментальных данных, полученных в работе [10]. При других значениях N_1 и N_2 и отношениях $\tau_d/\Delta t$, n_t/n_{s0} и n_t/n_{s1} проявление эффекта мертвого времени продлевающегося типа для рассматриваемого канала связи аналогично представленному на рис. 1.

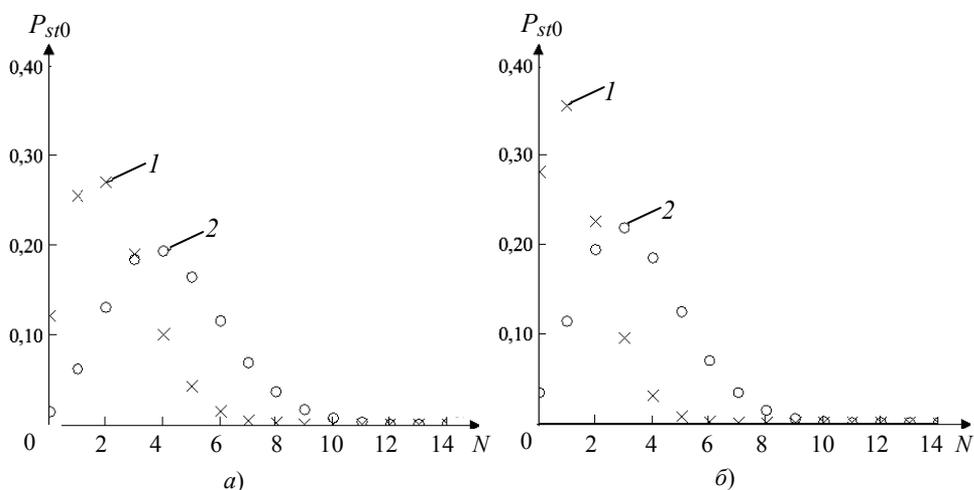
Как видно из рис. 1, с увеличением среднего времени однофотонной передачи вероятность ошибочной регистрации символов «0» $P_{\text{ош}0}$ уменьшается во всем исследуемом диапазоне значений Δt , в то время как для зависимостей $P_{\text{ош}1}(\Delta t)$ такой спад наблюдается при $\Delta t \geq 6,90$ мкс для $\tau_d = 0$; при $\Delta t \geq 11,21$ мкс для

$\tau_d = 5$ мкс; при $\Delta t \geq 15,53$ мкс для $\tau_d = 10$ мкс; при $\Delta t \geq 19,84$ мкс для $\tau_d = 15$ мкс. Причем рост средней длительности мертвого времени счетчика фотонов при прочих равных параметрах приема приводит к увеличению вероятностей ошибочной регистрации символов «0» и «1» в диапазоне значений Δt , на котором проявляется спад зависимостей $P_{\text{ош}0}(\Delta t)$ и $P_{\text{ош}1}(\Delta t)$. Указанные особенности поведения зависимостей $P_{\text{ош}0}(\Delta t)$ и $P_{\text{ош}1}(\Delta t)$ объясняются смещением статистических распределений смеси числа темновых и сигнальных импульсов $P_{st0}(N)$ и $P_{st1}(N)$ при передаче символов «0» и «1» соответственно с изменением среднего времени однофотонной передачи и средней длительности мертвого времени продлевающегося типа. Такие распределения могут быть получены на основе соответствующих выражений (1) и (2) по методике, приведенной в [16]. Поскольку для рассматриваемого канала связи проявление эффекта мертвого времени продлевающегося типа и влияние среднего времени однофотонной передачи аналогично как для распределений $P_{st0}(N)$, так и $P_{st1}(N)$, на рис. 2 приведены только статистические распределения смеси числа темновых и сигнальных импульсов при передаче символов «0» $P_{st0}(N)$.

Расчет статистических распределений $P_{st0}(N)$ выполнен для $n_t = 10^3 \text{ с}^{-1}$ и $n_{s0} = 85,3 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ исходя из тех же соображений, что и при построении рис. 1.

Важно отметить, что представленные на рис. 2 статистические распределения $P_{st0}(N)$ имеют схожий вид с распределениями смеси числа темновых и сигнальных импульсов, экспериментально полученными в работе [11]. Из рисунка 2 видно, что статистические распределения $P_{st0}(N)$ имеют явно выраженный максимум, свойственный для распределения Пуассона, который с увеличением среднего времени однофотонной передачи Δt сдвигается в сторону больших значений N как при наличии мертвого времени продлевающегося типа (см. рис. 2, б), так и при его отсутствии (см. рис. 2, а).

Для рассматриваемого канала связи вероятности приема поступающих на вход счетчика фотонов символов «0» и «1» определяются соответственно вероятностями регистрации импульсов в диапазоне от нижнего до верхнего пороговых уровней и в количестве, превышающем верхний пороговый уровень N_2 , что видно из формул (1) и (2).



**Рис. 2. Статистические распределения смеси числа темновых и сигнальных импульсов при передаче символов «0» для $\tau_d = 0$ (а) и $\tau_d = 10$ мкс (б) при среднем времени однофотонной передачи Δt :
1 – 25 мкс; 2 – 50 мкс**

При $\Delta t = \tau_d$ максимум распределения $P_{st0}(N)$ соответствует значению $N = 0$, то есть вероятность отсутствия импульсов на выходе счетчика фотонов достаточно большая, поэтому $P_{ош0} = 1$ (см. рис. 1, а). Аналогичная ситуация наблюдается и при $\Delta t = \tau_d$ для распределения $P_{st1}(N)$: максимум этого распределения соответствует значению $N = 0$, следовательно, вероятность отсутствия импульсов на выходе счетчика фотонов достаточно большая, поэтому $P_{ош1} = 1$ (см. рис. 1, б).

С увеличением Δt вероятность регистрации импульсов в количестве N_1, \dots, N_2 растет за счет сдвига $P_{st0}(N)$ в сторону больших значений N (см. рис. 2), поэтому вероятность ошибочной регистрации символов «0» уменьшается, и на всем исследуемом диапазоне значений Δt происходит спад зависимостей $P_{ош0}(\Delta t)$ (см. рис. 1, а). Аналогичный спад с ростом Δt имеет место и для вероятности $P_{ош1}$, который, однако, происходит при более высоких значениях среднего времени однофотонной передачи Δt , чем для вероятности $P_{ош0}$. Это объясняется следующим: при приеме символа «1» необходимо зарегистрировать импульсы в количестве, превышающем верхний пороговый уровень N_2 , что при прочих равных параметрах приема требует большего среднего времени однофотонной передачи, чем в случае регистрации символа «0». По этой причине спад зависимости $P_{ош1}(\Delta t)$ наблюдается при $\Delta t \geq 6,90$ мкс для $\tau_d = 0$; при $\Delta t \geq 11,21$ мкс для $\tau_d = 5$ мкс; при $\Delta t \geq 15,53$ мкс для $\tau_d = 10$ мкс; при $\Delta t \geq 19,84$ мкс для $\tau_d = 15$ мкс (см. рис. 1, б).

С ростом мертвого времени продлевающегося типа сокращается среднее время регистрации оптического излучения на величину τ_d , как видно из выражений (1) и (2), поэтому с увеличением τ_d максимум статистического распределения смеси числа темновых и сигнальных импульсов при передаче символов «0» $P_{st0}(N)$ сдвигается в сторону меньших значений N (см. рис. 2), как и максимум $P_{st1}(N)$ сдвигается в сторону меньших значений N . Следовательно, при прочих равных параметрах приема с ростом средней длительности мертвого времени продлевающегося типа вероятности регистрации импульсов на выходе счетчика фотонов в количестве N_1, \dots, N_2 и в количестве, превышающем верхний пороговый уровень, уменьшаются соответственно при передаче символов «0» и символов «1», и $P_{ош0}$ и $P_{ош1}$ растут. Так, например, при $\Delta t = 35$ мкс $P_{ош0}$ и $P_{ош1}$ равны соответственно $9,69 \cdot 10^{-2}$ и $7,78 \cdot 10^{-2}$ для $\tau_d = 0$; $10,74 \cdot 10^{-2}$ и $10,35 \cdot 10^{-2}$ для $\tau_d = 5$ мкс; $12,25 \cdot 10^{-2}$ и $14,65 \cdot 10^{-2}$ для $\tau_d = 10$ мкс; $14,57 \cdot 10^{-2}$ и $21,84 \cdot 10^{-2}$ для $\tau_d = 15$ мкс.

В качестве критериев оценки отклонений вероятностей ошибочной регистрации символов «0» и «1», полученных с учетом мертвого времени продлевающегося типа и без него, будем использовать параметры:

$$\sigma_{ош0} = \sqrt{\frac{\sum (P_{ош0} - P'_{ош0})^2}{N_{\Delta t}}}; \quad \sigma_{ош1} = \sqrt{\frac{\sum (P_{ош1} - P'_{ош1})^2}{N_{\Delta t}}}, \quad (3)$$

где $P_{ош0}$ и $P'_{ош0}$ – вероятности ошибочной регистрации символов «0», рассчитанные соответственно с учетом мертвого времени продлевающегося типа и без его учета; $P_{ош1}$ и $P'_{ош1}$ – вероятности ошибочной регистрации символов «1», рассчитанные соответственно с учетом мертвого времени продлевающегося типа и без его учета; $N_{\Delta t}$ – общее число временных интервалов Δt , по которым выполнялось сравнение вероятностей $P_{ош0}$ и $P'_{ош0}$ или $P_{ош1}$ и $P'_{ош1}$.

Для сопоставления отклонений вероятностей ошибочной регистрации символов «0» и «1» на рис. 3 представлены зависимости $\sigma_{\text{ош}0}/\Delta t$ и $\sigma_{\text{ош}1}/\Delta t$ от средней длительности мертвого времени продлевающегося типа при средней длительности передачи одного бита (символа) $\tau_b = 100$ мкс.

Исследования проводились при постоянном значении $N_{\Delta t}$. Из представленных результатов видно, что во всем диапазоне значений средней длительности мертвого времени наблюдается рост как $\sigma_{\text{ош}0}/\Delta t$, так и $\sigma_{\text{ош}1}/\Delta t$. Причем $\sigma_{\text{ош}0}/\Delta t \approx \sigma_{\text{ош}1}/\Delta t$ при $0 \leq \tau_d \leq 3$ мкс (см. рис. 3, кривые 1 и 2), однако при $\tau_d > 3$ мкс рост проявляется в большей мере для величины $\sigma_{\text{ош}1}/\Delta t$, чем для $\sigma_{\text{ош}0}/\Delta t$. Для оценки величины отклонения $\sigma_{\text{ош}0}/\Delta t$ от $\sigma_{\text{ош}1}/\Delta t$ использовался параметр $\Delta\sigma_{\text{ош}01} = |\sigma_{\text{ош}0}/\Delta t - \sigma_{\text{ош}1}/\Delta t|$.

Указанное поведение зависимостей $\sigma_{\text{ош}0}/\Delta t$ и $\sigma_{\text{ош}1}/\Delta t$ с увеличением средней длительности мертвого времени продлевающегося типа объясняется следующими причинами.

Число импульсов, незарегистрированных счетчиком фотонов из-за наличия мертвого времени (число просчетов) в случае приема символов «0» и «1» определяется соответственно как $(n_t + n_{s0}) \tau_d$ и $(n_t + n_{s1}) \tau_d$. Следовательно, при $\tau_d = 0$ число таких просчетов равно 0, поэтому $\sigma_{\text{ош}0}/\Delta t = \sigma_{\text{ош}1}/\Delta t = 0$. Однако при повышении средней длительности мертвого времени отклонения $P_{\text{ош}0}$ от $P'_{\text{ош}0}$ и $P_{\text{ош}1}$ от $P'_{\text{ош}1}$ растут за счет сдвига соответствующих распределений $P_{st0}(N)$ и $P_{st1}(N)$ в сторону меньших значений N , что объяснялось ранее. В результате с увеличением τ_d параметры $\sigma_{\text{ош}0}/\Delta t$ и $\sigma_{\text{ош}1}/\Delta t$ также растут.

При $\tau_d > 3$ мкс число просчетов в случае приема символов «1» оказывается больше, чем при регистрации символов «0», и вместе с тем такая тенденция проявляется тем больше, чем выше τ_d (см. рис. 3). Это объясняется тем, что для рассматриваемого канала связи критерием выбора n_{s0} и n_{s1} являются минимальные значения соответствующих вероятностей $P_{\text{ош}0}$ и $P_{\text{ош}1}$, обеспечиваемые при $n_{s1} > n_{s0}$. С увеличением τ_d средние скорости счета сигнальных импульсов n_{s0} и n_{s1} , при которых соответствующие вероятности $P_{\text{ош}0}$ и $P_{\text{ош}1}$ минимальны, также растут, причем такой рост имеет более выраженный характер для n_{s1} , чем для n_{s0} .

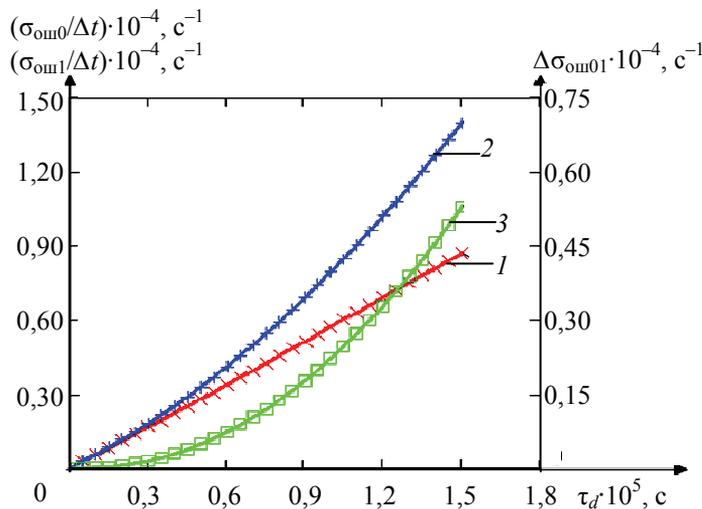


Рис. 3. Зависимости $\sigma_{\text{ош}0}/\Delta t$ (1), $\sigma_{\text{ош}1}/\Delta t$ (2) и $\Delta\sigma_{\text{ош}01}$ (3) от средней длительности мертвого времени

Например, наименьшие значения $P_{\text{ош}0} = 0,06$ и $P_{\text{ош}1} = 0,00$ достигаются соответственно при $n_{s0} = 74,1 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ и $n_{s1} = 38,9 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ для $\tau_d = 5$ мкс; при $n_{s0} = 83,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ и $n_{s1} = 43,7 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ для $\tau_d = 10$ мкс.

Заключение

Получены выражения для оценки вероятностей ошибочной регистрации данных, передаваемых по дискретному двоичному асинхронному однородному квантово-криптографическому каналу связи без памяти и со стиранием, в котором в качестве приемного модуля использовался счетчик фотонов с мертвым временем продлевающегося типа.

Установлено, что с увеличением среднего времени однофотонной передачи информации вероятность ошибочной регистрации символов «0» $P_{\text{ош}0}$ уменьшается во всем исследуемом диапазоне значений Δt , в то время, как для зависимостей $P_{\text{ош}1}(\Delta t)$ такой спад наблюдается при $\Delta t \geq 6,90$ мкс для $\tau_d = 0$; при $\Delta t \geq 11,21$ мкс для $\tau_d = 5$ мкс; при $\Delta t \geq 15,53$ мкс для $\tau_d = 10$ мкс; при $\Delta t \geq 19,84$ мкс для $\tau_d = 15$ мкс.

Определено, что в диапазонах значений Δt , на которых имеет место спад зависимостей $P_{\text{ош}0}(\Delta t)$ и $P_{\text{ош}1}(\Delta t)$, увеличение мертвого времени продлевающегося типа приводит к росту вероятностей ошибочной регистрации как символов «0», так и символов «1».

Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы при создании систем квантово-криптографической связи, функционирующих в асинхронном режиме передачи и приема двоичных данных и позволяющих обнаруживать несанкционированный доступ к информации за счет контроля числа ошибок в канале связи. Так, например, в случае реализации системы связи на базе приемопередающих устройств [1], результаты представленных в настоящей работе исследований позволяют обосновать выбор наименьшего времени однофотонной передачи информации, при котором вероятности ошибочной регистрации символов «0» и «1» минимальны, что повысит достоверность определения подлинности передаваемой информации и их источника и увеличит скорость передачи информации. Учитывая весьма низкие скорости передачи информации для указанных каналов связи, перспективным является проведение их оптимизации, используя в качестве критерия оптимальности величину наибольшей пропускной способности, что планируется выполнить в ходе дальнейших исследований.

Список литературы

1. Тимофеев, А. М. Устройство для передачи и приема двоичных данных по волоконно-оптическому каналу связи / А. М. Тимофеев // Приборы и методы измерений. – 2018. – Т. 9, № 1. – С. 17 – 27. doi: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-17-27
2. Калачев, А. А. Элементная база дальнедействующей квантовой связи. Часть 1 / А. А. Калачев // Фотоника. – 2017. – № 1. – С. 88 – 98. doi: 10.22184/1993-7296.2017.61.1.88.98
3. Single-Photon Counters in the Telecom Wavelength Region of 1550 nm for Quantum Information Processing / M. Bourennane [et al.] // Journal of Modern Optics. – 2001. – Vol. 48, No. 13. – P. 1983 – 1995. doi: 10.1080/09500340110075131
4. Килин, С. Я. Квантовая криптография: идеи и практика / С. Я. Килин, Д. Б. Хорошко, А. П. Низовцев. – Минск : Белорус. наука, 2007. – 391 с.
5. Cova, S. D. Single-Photon Counting Detectors / S. D. Cova, M. Ghioni // IEEE Photonics Journal. – 2011. – Vol. 3, No. 2. – P. 274 – 277. doi: 10.1109/JPHOT.2011.2130518
6. Single-Photon Experiments at Telecommunication Wavelengths Using Nanowire Superconducting Detectors / C. Zinoni [et al.] // Applied Physics Letters. – 2007. – Vol. 91. – P. 031106-1 – 031106-3. doi: 10.1063/1.2752108

7. Advances in InGaAs/InP Single-Photon Detector Systems for Quantum Communication / J. Zhang [et al.] // *Light: Science & Applications*. – 2015. – Vol. 4. – P. 1 – 13. doi: 10.1038/lsa.2015.59
8. Reduced Deadtime and Higher Rate Photon-Counting Detection Using a Multiplexed Detector Array / S. A. Castelletto [et al.] // *Journal of Modern Optics*. – 2007. – Vol. 54. – P. 337 – 352. doi: 10.1080/09500340600779579
9. Stipčević, M. Characterization of a Novel Avalanche Photodiode for Single Photon Detection in VIS-NIR Range / M. Stipčević, H. Skenderovic, D. Gracin // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18, No. 16. – P. 17448 – 17459. doi: 10.1364/OE.18.017448
10. Исследование пропускной способности асинхронного оптического канала связи с приемником на основе счетчика фотонов / И. Р. Гулаков [и др.] // *Приборы и методы измерений*. – 2013. – № 2 (7). – С. 80 – 87.
11. Гулаков, И. Р. Исследование скорости передачи информации по оптическому каналу связи с приемником на основе счетчика фотонов / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, А. М. Тимофеев // *Автометрия*. – 2011. – Т. 47, № 4. – С. 31 – 40.
12. Абед, А. Х. А. Метод шифрования передаваемой информации по случайному закону / А. Х. А. Абед // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2016. – Т. 22, № 2. – С. 233 – 237. doi: 10.17277/vestnik.2016.02.pp.233-237
13. Беспроводной канал передачи информации со скоростью 40 Гбит/с / А. А. Боев [и др.] // *Вестн. Рязанского гос. радиотехн. ун-та*. – 2017. – № 62. – С. 44 – 48. doi: 10.21667/1995-4565-2017-62-4-44-48
14. Тимофеев, А. М. Энтропия потерь однофотонного асинхронного волоконно-оптического канала связи с приемником на основе счетчика фотонов с продлевающимся мертвым временем / А. М. Тимофеев // *Актуальные проблемы науки XXI века*. – 2018. – Вып. 7. – С. 5 – 10.
15. Тимофеев, А. М. Оценка влияния продлевающегося мертвого времени счетчика фотонов на вероятность ошибочной регистрации данных квантово-криптографических каналов связи / А. М. Тимофеев // *Вестник связи*. – 2018. – № 1 (147). – С. 56 – 62.
16. Гольданский, В. И. Статистика отсчетов при регистрации ядерных частиц / В. И. Гольданский, А. В. Куценко, М. И. Подгорецкий. – М. : Гос. изд-во физико-математической литературы, 1959. – 411 с.

The Effect of Single Photon Transmission Time on the Probability of Erroneous Registration of Asynchronous Data of Quantum Cryptographic Communication Channels

A. M. Timofeev

*Department of Information Security, Belarusian State University of Informatics
and Radio Electronics, Minsk, Republic of Belarus; tamvks@mail.ru*

Keywords: quantum-cryptographic communication channel; dead time; photon counter.

Abstract: Expressions are determined to estimate the probabilities of erroneous recording of binary data of a quantum-cryptographic communication channel containing a photon counter with an extending dead time.

According to the results of mathematical modeling, the dependences of the probabilities of erroneous data recording at the output of the communication channel are established on the average single-photon transmission time of the characters “0” and “1”, on the basis of which the choice of the smallest average transmission time per bit (character), providing the smallest loss of information transmitted, is justified.

The obtained results make it possible to increase the accuracy of determining unauthorized access to information transmitted over a discrete binary asynchronous homogeneous quantum-cryptographic communication channel without memory and with erasure.

References

1. Timofeev A.M. [Device for binary data transmitting and receiving over a fiber-optic communication channel], *Pribory i metody izmereniy* [Devices and Methods of Measurements], 2018, vol. 9, no. 1, pp. 17-27, doi: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-17-27 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Kalachev A.A. [Elemental base of long-range quantum coupling. Part 1], *Fotonika* [Photonics], 2017, no. 1, pp. 88-98, doi: 10.22184/1993-7296.2017.61.1.88.98 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Bourennane M., Karlsson A., Ciscar J.P., Mathes M. Single-photon counters in the telecom wavelength region of 1550 nm for quantum information processing, *Journal of modern optics*, 2001, vol. 48, no. 13, pp. 1983-1995, doi: 10.1080/09500340110075131
4. Kilin S.Ya. [Ed.], Khoroshko D.B., Nizovtsev A.P. *Kvantovaya kriptografiya: idei i praktika* [Quantum cryptography: ideas and practice], Minsk: Belorusskaya nauka, 2007, 391 p. (In Russ.)
5. Cova S.D., Ghioni M. Single-photon counting detectors, *IEEE Photonics Journal*, 2011, vol. 3, no. 2, pp. 274-277, doi: 10.1109/JPHOT.2011.2130518
6. Zinoni C., Alloing B., Li L.H., Marsili F., Fiore A. Single-photon experiments at telecommunication wavelengths using nanowire superconducting detectors, *Applied Physics Letters*, 2007, vol. 91, pp. 031106-1-031106-3, doi: 10.1063/1.2752108
7. Zhang J., Itzler M.A., Zbinden H., Pan J.-W. Advances in InGaAs/InP single-photon detector systems for quantum communication, *Light: Science & Applications*, 2015, vol. 4, pp. 1-13, doi: 10.1038/lsa.2015.59
8. Castelletto S.A., Degiovanni I.P., Schettini V., Migdall A.L. Reduced deadtime and higher rate photon-counting detection using a multiplexed detector array, *Journal of Modern Optics*, 2007, vol. 54, pp. 337-352, doi: 10.1080/09500340600779579
9. Stipčević M., Skenderovic H., Gracin D. Characterization of a novel avalanche photodiode for single photon detection in VIS-NIR range, *Optics Express*, 2010, vol. 18, no. 16, pp. 17448-17459, doi: 10.1364/OE.18.017448
10. Gulakov I.R., Zenevich A.O., Timofeyev A.M., Kosari A.G. [Investigation of the throughput capacity of an asynchronous optic communication channel with a receiver based on a photon counter], *Pribory i metody izmereniy* [Instruments and measurement methods], 2013, no. 2 (7), pp. 80-87. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Gulakov I.R., Zenevich A.O., Timofeyev A.M. [Investigation of the information transfer rate over an optical communication channel with a receiver based on a photon counter], *Avtometriya* [Avtometriya], 2011, vol. 47, no. 4, pp. 31-40. (In Russ.)
12. Abed A.Kh.A. [The method of encryption of transmitted information by random law], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 2, pp. 233-237, doi: 10.17277/vestnik.2016.02.pp.233-237 (In Russ., abstract in Eng.)
13. Boyev A.A., Kernosov M.Yu., Kuznetsov S.N., Ognev B.I., Parshin A.A. [Wireless data transmission channel with a speed of 40 Gbit], *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University], 2017, no. 62, pp. 44-48, doi: 10.21667/1995-4565-2017-62-4-44-48 (In Russ., abstract in Eng.)
14. Timofeev A.M. [Entropy of losses of a single-photon asynchronous fiber-optic communication channel with a receiver based on a photon counter with prolonged dead time], *Aktualnyye problemy nauki XXI veka* [Current issues of science in the 21st century], 2018, vol. 7, pp. 5-10. (In Russ., abstract in Eng.)

15. Timofeev A.M. [Estimation of the photons counter lasting dead time influence on the probability of erroneous data registration of quantum-cryptographic communication channels], *Vestnik svyazi* [Communication bulletin], 2018, no. 1 (147), pp. 56-62. (In Russ., abstract in Eng.)

16. Gol'danskiy V.I., Kutsenko A.V., Podgoretskiy M.I. *Statistika otschetov pri registratsii yadernykh chastits* [Statistics of counts in the registration of nuclear particles], Moscow: Gosudarstvennoye izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury, 1959, 411 p. (In Russ.)

Der Einfluss der Einzelphotonenübertragungszeit der Information auf die Wahrscheinlichkeit einer fehlerhaften Registrierung asynchroner Daten der quantenkryptographischen Kommunikationskanäle

Zusammenfassung: Es sind die Ausdrücke zum Schätzen der Wahrscheinlichkeiten einer fehlerhaften Registrierung binärer Daten eines quantenkryptographischen Kommunikationskanals bestimmt, der einen Photonenzähler mit einer Totzeit eines verlängerten Typs enthält. Den Ergebnissen der mathematischen Modellierung nach sind die Abhängigkeiten der Wahrscheinlichkeiten einer fehlerhaften Datenaufzeichnung am Ausgang des Kommunikationskanals von der durchschnittlichen Einzelphotonen-Übertragungszeit der Zeichen "0" und "1" festgelegt, auf deren Grundlage die Wahl der kleinsten durchschnittlichen Übertragungszeit pro Bit (Zeichen) begründet ist, die den geringsten Verlust der übertragenen Information gewährleistet. Die erhaltenen Ergebnisse ermöglichen es, die Zuverlässigkeit des Bestimmens eines nicht autorisierten Zugriffs auf Informationen zu erhöhen, die über einen diskreten binären asynchronen homogenen quantenkryptographischen Kommunikationskanal ohne Speicher und mit Löschung übertragen werden.

Influence du temps de la transmission monophotonique d'informations sur la probabilité de l'enregistrement erroné des données des canaux de la communication asynchrones quantiques-cryptographiques

Résumé: Sont définies des expressions pour évaluer les probabilités d'enregistrement erroné des données binaires d'un canal de la communication quantique-cryptographique contenant un compteur de photons avec un temps mort du type prolongé. Les résultats de la simulation mathématique montrent que les données sont probablement enregistrées de manière erronée à la sortie du canal de communication à partir du temps moyen du transfert monophotonique des caractères "0" et "1", à la base duquel il est justifié de choisir le temps moyen du transfert d'un bit (symbole), ce qui garantit la perte la plus faible de l'information transmise. Les résultats obtenus permettent d'améliorer la fiabilité de la définition de l'accès non autorisé aux informations transmises par un canal de la communication binaire asynchrone homogène quantique-cryptographique discret sans mémoire et avec effacement.

Автор: *Тимофеев Александр Михайлович* – кандидат технических наук, доцент кафедры защиты информации, УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», г. Минск, Республика Беларусь.

Рецензент: *Жарин Анатолий Лаврентьевич* – доктор технических наук, профессор кафедры информационно-измерительной техники и технологии, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь.

ПРИМЕНЕНИЕ КАЛМАНОВСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКИХ ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ В ТРЕТИЧНОЙ ОБРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИИ

А. И. Рогачёв, А. И. Сустин, Ю. Н. Панасюк,
А. П. Пудовкин, С. Н. Данилов

*Кафедра «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ»,
г. Тамбов, Россия; resbn@jesby.tstu.ru*

Ключевые слова: воздушные суда; информационно-измерительные системы; модель; третичная обработка информации; угломерный канал; фильтр Калмана.

Аннотация: Разработан алгоритм функционирования угломерного канала информационно-измерительной системы с применением калмановской фильтрации для метода динамических весовых коэффициентов в третичной обработке информации. Обоснован выбор моделей состояния и наблюдения, проведено имитационное моделирование на ЭВМ и представлены результаты исследования алгоритма функционирования угломерного канала информационно-измерительной системы.

Проблема точности, устойчивости информационно-измерительных систем (ИИС) управления воздушным движением (УВД) со вторичной обработкой информации связана с тем, что движение воздушных судов (ВС) в районе аэродрома не соответствует существующим классическим моделям движения ВС [1]. Исследования показывают, что при маневрах (вираж, разворот и т.д.) возникают большие ошибки оценки координат ВС, которые не соответствуют современным требованиям к системам УВД по обеспечению пропускной способности при заданном уровне безопасности воздушного движения [1]. Для повышения точности оценки координат ВС при вторичной обработке информации в ИИС необходимо усложнять модели движения ВС, что увеличивает вычислительные затраты. Предпочтительным вариантом решения данной проблемы является синтез алгоритмов функционирования угломерного (дальномерного) канала ИИС УВД с использованием третичной обработки информации (ТОИ). Выгодное отличие ТОИ состоит в том, что использование нескольких радиолокационных станций (РЛС) позволяет с высоким качеством обработать радиолокационную информацию на основе существующих классических моделей движения ВС.

Цель работы – синтез алгоритма функционирования угломерного канала ИИС с применением калмановской фильтрации для метода динамических весовых коэффициентов в ТОИ.

Для синтеза алгоритма функционирования угломерного канала ИИС с применением калмановской фильтрации для метода динамических весовых коэффициентов в ТОИ используется зингеровская модель состояния и наблюдения [2 – 4]:

$$\varphi(k) = \varphi(k-1) + \omega(k-1)T + 0,5a(k-1)T; \quad (1)$$

$$\omega(k) = \omega(k-1) + a(k-1)T; \quad (2)$$

$$a(k) = (1 - \alpha_\phi T)a(k-1) + \xi_a(k-1); \quad (3)$$

$$\varphi_{\text{и}}(k) = \varphi(k) + \xi_{\varphi_{\text{и}}}(k), \quad (4)$$

где $\varphi(k)$ – азимут ВС; $\omega(k)$, $a(k)$ – скорость и ускорение изменения азимута ВС соответственно; k – номера отсчетов, взятых с дискретностью T , равной шагу вычисления; $\varphi_{\text{и}}(k)$ – измеренное значение азимута ВС; $\xi_a(k-1)$ – дискретный центрированный гауссовский шум с известной дисперсией D_a ; $\xi_{\varphi_{\text{и}}}(k)$ – дискретный центрированный гауссовский шум измерения с известной дисперсией $D_{\varphi_{\text{и}}}$; α_ϕ – постоянная времени маневра ВС.

Учитывая модели состояния (1) – (3) и наблюдения (4), содержащие информацию об азимуте ВС, и выражения для линейной фильтрации [1, 5], получим алгоритм фильтрации для угломерного канала:

$$\varphi_o(k) = \varphi_3(k) + K_{\phi 11}(k) \Delta \varphi(k); \quad (5)$$

$$\omega_o(k) = \omega_3(k) + K_{\phi 21}(k) \Delta \varphi(k); \quad (6)$$

$$a_o(k) = a_3(k) + K_{\phi 31}(k) \Delta \varphi(k); \quad (7)$$

$$\varphi_3(k) = \varphi_o(k-1) + \omega_o(k-1)T + 0,5a_o(k-1)T^2 \quad (8)$$

$$\omega_3(k) = \omega_o(k-1) + a_o(k-1)T; \quad (9)$$

$$a_3(k) = (1 - \alpha_\phi T)a_3(k-1) + \xi_a(k-1); \quad (10)$$

$$\Delta \varphi(k) = \varphi_{\text{и}}(k) - \varphi_3(k), \quad (11)$$

где переменные с индексами «о», «э» – оцененные и экстраполированные значения соответствующих величин; $K_{\phi 11}$, $K_{\phi 21}$ и $K_{\phi 31}$ – коэффициенты усиления калмановского фильтра; $\Delta \varphi(k)$ – невязка фильтра Калмана.

Для исследования алгоритма функционирования угломерного канала ИИС УВД была создана модель полета ВС для маневра «большая коробочка» при помощи дифференциальных перегрузочных уравнений [6]. В результате получены изменения азимутальных углов $\varphi_{\text{РЛС1}}$ и $\varphi_{\text{РЛС2}}$ ВС для РЛС1 и РЛС2 (рис. 1).

На основании алгоритма (5) – (11) и рис. 1 проводилось имитационное моделирование угломерных каналов РЛС1 и РЛС2 на примере сопровождения одного ВС. Результаты моделирования представлены на рис. 2, где показано, что при одинаковом азимуте ВС, значения невязок оценки азимута РЛС1 и РЛС2 отличаются.

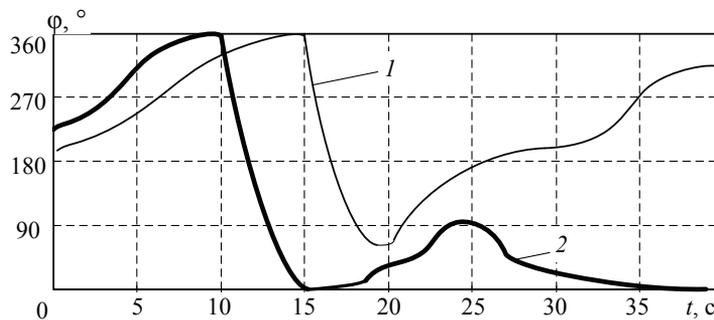


Рис. 1. Изменение азимута воздушного судна относительно РЛС1 (1) и РЛС2 (2)

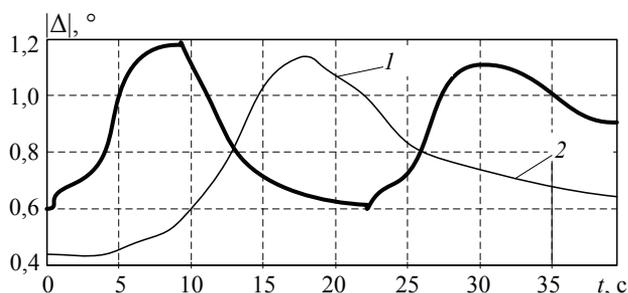


Рис. 2. Невязки азимута воздушного судна РЛС1 (1) и РЛС2 (2)

Информацию о значениях невязок можно использовать при ТОИ. При третичной обработке радиолокационной информации используются две РЛС, которые входят в состав ИИС УВД (рис. 3).

Для улучшения точностных характеристик угломерного канала ИИС, необходимо учитывать весовые коэффициенты [7]

$$\varphi_{\text{ТОИ}} = \frac{b_1\varphi_1 + b_2\varphi_2}{b_1 + b_2}, \quad (12)$$

где b_1 и b_2 – весовые коэффициенты измерителей РЛС1 и РЛС2 соответственно, которые вычисляются по формулам [1, 7]:

$$b_1 = \frac{1}{\Delta\varphi_1^2}; \quad b_2 = \frac{1}{\Delta\varphi_2^2}. \quad (13)$$

Результаты моделирования в виде временной зависимости среднеквадратичной ошибки оценки азимута σ_φ для РЛС1, РЛС2 и ТОИ представлены на рис. 4.

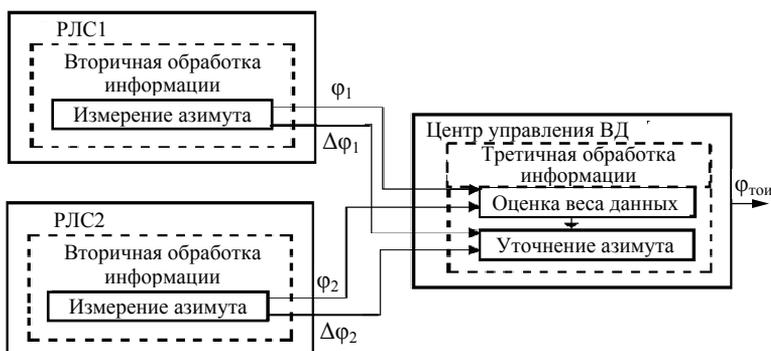


Рис. 3. Структурная схема угломерного канала

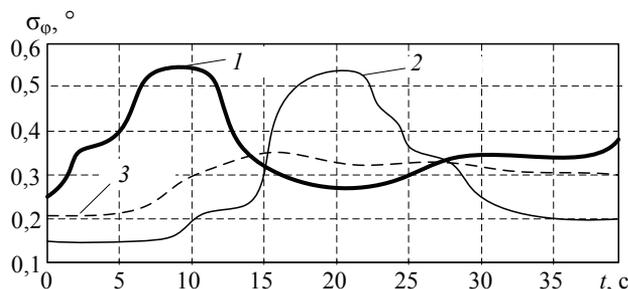


Рис. 4. Среднеквадратичные ошибки азимута РЛС1 (1), РЛС2 (2) и ТОИ (3)

Из результатов моделирования очевидно, что с применением калмановской фильтрации для метода динамических весовых коэффициентов в угломерном канале ИИС ТОИ повышает точность оценки азимута по сравнению с угломерным каналом РЛС. Это объясняется различными точностными характеристиками оценивания азимута ВС для угломерных каналов РЛС1 и РЛС2, размещенных на определенном расстоянии друг от друга, и возможностью обработки информации об азимутальных углах ВС в ИИС ТОИ.

Угломерный канал ИИС с применением калмановской фильтрации для метода динамических весовых коэффициентов в ТОИ, по сравнению с угломерным каналом РЛС со вторичной обработкой информации, позволяет повысить точность определения азимута систем УВД не менее чем на 30 %, а это в свою очередь позволит повысить пропускную способность ВС в районе аэродрома не менее чем на 15 % при заданном уровне безопасности полетов.

Список литературы

1. Пудовкин, А. П. Перспективные методы обработки информации в радиотехнических системах : монография / А. П. Пудовкин, С. Н. Данилов, Ю. Н. Панасюк. – СПб. : Экспертные решения, 2014. – 256 с.

2. Данилов, С. Н. Алгоритм сопровождения с реконfigurацией модели / С. Н. Данилов, Р. А. Ефремов, Н. А. Кольтюков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 3. – С. 418 – 423. doi: 10.17277/vestnik.2015.03.pp.418-423

3. Точностные характеристики навигационных комплексов, использующих контроль целостности спутниковых радионавигационных систем для реконfigurации / А. В. Иванов [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 4. – С. 572 – 577. doi: 10.17277/vestnik.2015.04.pp.572-577

4. Прогнозирование квазигармонического сигнала в пространстве состояний / С. Н. Данилов [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 374 – 380. doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.374-380

5. Использование динамических характеристик воздушного судна в информационно-измерительных системах / Ю. Н. Панасюк [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 381 – 386. doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.381-386

6. Тарасенков А. М. Динамика полета и боевое маневрирование летательного аппарата / А. М. Тарасенков. – М. : Изд-во ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1984. – 312 с.

7. Панасюк, Ю. Н. Метод повышения точности третичной обработки информации с применением динамических весовых коэффициентов / Ю. Н. Панасюк, А. П. Пудовкин, А. И. Рогачёв // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 595 – 600. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.595-600

Application of Kalman Filtering for the Method of Dynamic Weights in Tertiary Information Processing

**A. I. Rogachev, A. I. Sustin, Yu. N. Panasyuk,
A. P. Pudovkin, S. N. Danilov**

*Department of Radio Engineering, TSTU,
Tambov, Russia; resbn@jesby.tstu.ru*

Keywords: aircraft; information and measuring systems; model; tertiary information processing; goniometer channel; Kalman filter.

Abstract: An algorithm for the operation of the angular channel of an information-measuring system using Kalman filtering has been developed for the method of dynamic weights in the tertiary information processing. The choice of the models of state and observation is substantiated; computer simulation has been carried out; the results of the research into the operation of the goniometric channel of the information-measuring system are presented.

References

1. Pudovkin A.P., Danilov S.N., Panasyuk Yu.N. *Perspektivnye metody obrabotki informatsii v radiotekhnicheskikh sistemakh* [Perspective methods of information processing in radio engineering systems], St. Petersburg: Ekspertnye resheniya, 2014, 256 p. (In Russ.)
2. Danilov S.N., Efremov R.A., Koltyukov N.A. [Model Reconfiguration Tracking Algorithm], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 3, pp. 418-423, doi: 10.17277/vestnik.2015.03.pp.418-423 (In Russ., Abstract in Eng.)
3. Ivanov A.V., Komrakov D.V., Moskvitin S.P., Chernyshov V.N. [Accuracy Characteristics of Navigation Systems Using Continuity Testing of Satellite Navigation Systems for Solving Problems of Reconfiguration], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 4, pp. 572-577, doi: 10.17277/vestnik.2015.04.pp.572-577 (In Russ., Abstract in Eng.)
4. Danilov S.N., Kol'tyukov N.A., Petrov S.V., Chernyshova T.I. [Prediction of a quasi-harmonic signal in the state space], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 374-380, doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.374-380 (In Russ., Abstract in Eng.)
5. Panasyuk Yu.N., Pudovkin A.P., Knyazev I.V., Glistin V.N. [Use of the dynamic characteristics of an aircraft in information-measuring systems], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 381-386, doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.381-386 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Tarasenkov A.M. *Dinamika poleta i boyevoye manevrirovaniye letatel'nogo apparata* [Flight dynamics and combat maneuvering of an aircraft], Moscow: Izdatel'stvo VVIA im. prof. N. Ye. Zhukovskogo, 1984, 312 p. (In Russ.)
7. Panasyuk Yu.N., Pudovkin A.P., Rogachov A.I. [A method for improving the accuracy of tertiary information processing using dynamic weighting coefficients], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 595-600, doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.595-600 (In Russ., abstract in Eng.)

Anwendung der Kalman-Filterung für die Methode der dynamischen Gewichtskoeffizienten in der tertiären Informationsverarbeitung

Zusammenfassung: Es ist ein Algorithmus für das Funktionieren des Winkelkanals des Informations- und Messsystems mit Anwendung der Kalman-Filterung für die Methode der dynamischen Gewichtskoeffizienten in der tertiären Informationsverarbeitung entwickelt. Die Auswahl der Zustands- und Beobachtungsmodelle ist begründet, es ist Simulationsmodellierung auf Datenverarbeitungsanlagen (EDV) durchgeführt und die Ergebnisse der Untersuchung des Algorithmus für das Funktionieren des Winkelkanals des Informations- und Messsystems sind präsentiert.

Application du filtrage Kalman pour la méthode des coefficients dynamiques et de poids dans le traitement tertiaire de l'information

Résumé: Est élaboré un algorithme pour le fonctionnement du canal angulaire du système d'information et de mesure à l'aide de la filtration Kalman pour la méthode des coefficients dynamiques et de poids dans le traitement tertiaire de l'information. Est argumenté le choix des modèles d'état et d'observation; est réalisée la simulation sur l'ordinateur; sont présentés les résultats de la recherche de l'algorithme de fonctionnement du canal angulaire du système d'information et de mesure.

Авторы: *Рогачёв Алексей Игоревич* – магистрант; *Сустин Александр Иванович* – магистрант; *Панасюк Юрий Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехника»; *Пудовкин Анатолий Петрович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиотехника»; *Данилов Станислав Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Иванов Александр Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МНОГОСВЯЗНЫХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

**М. Н. М. Саиф, В. Г. Матвейкин,
Б. С. Дмитриевский, А. В. Башкатова, А. А. Мамонтов**

*Кафедра «Информационные процессы и управление»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; dmiboris@yandex.ru*

Ключевые слова: математическая модель; объект управления; система управления; сталеплавильная печь; управляющее воздействие; сушильная установка.

Аннотация: Рассмотрены теоретические и методологические основы построения математических моделей многосвязных объектов управления. Составление математической модели проведено на основе имеющихся представлений о конкретном виде качественных зависимостей между переменными объекта; учтены условия, которые должны соблюдаться при решении задачи управления. Результаты изучения представлены графически в виде структурной схемы при формализации задачи. Математическая модель сформулирована с учетом выявленной структуры объекта. В качестве примеров рассмотрены процессы сушки дисперсий и процессы плавления в дуговой сталеплавильной печи.

Введение

Объектом системы управления нижнего уровня является отдельный агрегат технологической схемы или группа взаимосвязанных агрегатов, представляющих собой единую технологическую установку [1 – 6]. В связи с многообразием объектов для местных систем управления характерно разнообразие задач управления, методов управления и технических средств реализации алгоритмов управления.

Одна из наиболее характерных особенностей системы управления нижнего уровня заключается в том, что модели объектов управления, используемые при создании местных систем, могут существенно отличаться от используемых на высших ступенях иерархии. При этом модели объектов управления в местных системах, как правило, характеризуются более глубоким проникновением в механизм исследуемых процессов и служат основой для разработки автоматизированной системы управления.

Теоретический анализ

Процессы, происходящие в технологических агрегатах, представляют собой сложное переплетение физико-химических, тепломассообменных и других процессов, что, с одной стороны, дает возможность одновременного исследования целого класса различных, но однотипных аппаратов, с другой, – приводит к сложным математическим зависимостям.

Математические модели агрегатов могут иметь вид дифференциальных уравнений в частных производных, обыкновенных дифференциальных уравнений, нелинейных и линейных алгебраических соотношений. Модели объектов местных систем, как правило, более сложные по структуре, но имеют меньшую размерность, чем модели объектов верхнего уровня управления.

Разнообразие объектов управления вызывает, в свою очередь, многообразие критериев управления. Если на высших ступенях управления критерии эффективности, как правило, однотипны и носят экономический характер (прибыль, производительность, себестоимость), то на нижнем уровне управления данный критерий чаще является техническим.

Условия, которые должны соблюдаться при решении задачи управления, определяются, с одной стороны, ограниченными возможностями объекта (например, предельная производительность, максимальная допустимая температура, давление и т.д.), с другой, – связями данного агрегата с другими участками производства. Ограничения, зависящие от последних, на нижнем уровне управления определяются либо технологическим регламентом, либо высшей ступенью управления. Своеобразие моделей объектов и специфика задач управления накладывают отпечаток и на выбор математических методов для их решения.

Системы нижнего уровня характеризуются более непосредственной связью с объектом. В большинстве случаев информация вводится в систему управления от датчиков автоматически, управляющие воздействия могут поступать непосредственно на регулирующие клапаны. В системах управления высшего уровня, напротив, связь с объектом практически осуществляется, в основном, через человека. В системах управления нижнего уровня сбор информации и выдача управляющих воздействий обычно проводятся с большей частотой, чем на верхних ступенях иерархии.

Вследствие многообразия форм связи с объектом технические средства, применяемые на нижней ступени управления, значительно более разнообразны и многочисленны, чем средства, используемые на верхних уровнях иерархии. Перечисленные особенности местных систем управления обуславливают специфику методики построения системы управления агрегатами и техническими процессами.

Методика построения системы управления техническими объектами

При описании существующей структуры управляющей части системы предполагаем, что до автоматизации все основные задачи, связанные с управлением установкой, решаются только людьми, которых условно делят на две основные группы – технологов и операторов.

Первая разрабатывает технологические инструкции, которые помимо общих рекомендаций содержат инструктивные требования и оперативные указания к способам ведения и техническим показателям процесса. По мере накопления знаний об установке, а также изменений в ее конструкции и свойствах используемых материалов, способы управления устаревают и заменяются новыми.

Группа операторов принимает и реализует решения об управлении с учетом требований технических инструкций и полученных заданий по номенклатуре продукта, объему выпуска и т.д. Эти задания поступают в управляющую часть от вышестоящей ступени производственной иерархии.

При описании управляющей части необходимо перечислить всех штатных технологов и операторов, указать функции каждого из них и выделить информационные потоки, необходимые для выполнения этих функций. Функции операторов удобно связывать с соответствующими органами управления установкой. При таком подходе функции операторов сводятся к выбору состояния соответствующего органа управления в данный момент времени в зависимости от содержания соответствующего информационного потока.

Результаты изучения управляющей части удобно представить графически. На такой схеме информационные потоки будут исходить от вышестоящей производственной ступени и органов измерения установки, группироваться в соответствии с распределенными функциями между операторами и технологами и в форме принятых решений замыкаться на органах управления установкой.

При изучении существующей системы управления целесообразно обращать особое внимание на факторы, которые формируются вышестоящей иерархической ступенью для стимулирования тех или иных решений операторов и технологов установки. Совокупность этих факторов является неформализованным критерием для управляющей части системы и должна способствовать улучшению основных технико-экономических показателей участка производства, включающего рассматриваемую установку. Основными источниками информации о принятом порядке стимулирования служат некоторые положения технологических инструкций и действующая система премирования. Остальные средства воздействия на операторов носят субъективный характер и с большим трудом поддаются последующей формализации.

Отметим, что существующие системы стимулирования могут быть несовершенными и содержать противоречивые требования, которые необходимо проанализировать перед формулированием цели управления. Ограничения, действующие на установке, обычно удается зафиксировать без особых трудностей.

При начальном знакомстве с исследуемой установкой важно вскрыть причины потерь, связанные с недостатками существующих алгоритмов и системы управления. Такие недостатки обычно являются следствием ограниченных возможностей человека, которые проявляются при управлении сложными установками, быстротечными плохо наблюдаемыми технологическими процессами, при повышенных требованиях к качеству продукции и во многих аналогичных ситуациях. Возможны потери из-за неправильного распределения информационных потоков, отсутствия приборов для измерения важных переменных объекта, органов управления для измерения существенных характеристик каких-либо материальных или энергетических потоков установки и т.д. Знание всех этих причин сделает последующую работу по формализации задачи более целенаправленной и позволит априорно оценивать эффективность тех или иных решений.

Составление структурной схемы предшествует идентификации объекта: это некоторая первоначальная формализация априорных данных об объекте. Структурная схема обладает наглядностью, позволяющей представить объект управления в виде некоторой модели с причинно-следственной связью между переменными. Она позволяет провести структурную декомпозицию задачи, то есть разделить общую задачу управления на несколько более простых подзадач.

Структурная схема представляет собой условное графическое изображение объекта управления в виде ряда элементов, соединенных между собой и с окружающей системой однонаправленными связями. Эти связи символизируют переменные, характеризующие состояние объекта, называемые координатами.

Координаты являются переменными в уравнениях, описывающих объект (коэффициенты этих уравнений называют параметрами объекта). Элементы структурной схемы представляют собой определенные математические преобразования координат объекта в отличие от принципиальной схемы, элементами которой являются отдельные аппараты и агрегаты, а связи между ними и с окружающей средой представляют собой потоки энергии и материалов. При составлении структурной схемы стремятся к делению объекта на возможно более простые элементы, каждый из которых имел бы небольшое число координат.

Исходными данными для построения структурной схемы являются выделенные на этапе формулирования задачи управления управляющие воздействия, выходные координаты и наблюдаемые переменные. На структурной схеме изображаются также возмущающие воздействия и промежуточные координаты.

Формирование математической модели процесса сушки

Сушка – сложный процесс тепломассообмена, вызывающий физико-химические превращения в высушиваемых материалах. Процесс сушки дисперсий – жидких текучих материалов (суспензий, паст, влажных осадков и т.п.) – широко применяется в процессах химической, пищевой, фармацевтической и других отраслях промышленности [7, 8]. Типичными примерами сушилок таких материалов являются распылительные сушилки с фонтанирующим и кипящим слоем и некоторые др. Параметры, необходимые для управления процессом сушки, могут быть разделены на три основные группы: энергетические, физико-химические, механические и геометрические.

К первой группе относятся (при подводе энергии с помощью теплоносителя) – температура, энтальпия, расход и его влагосодержание, характеризующие подачу и распределение тепловой энергии, а также теплотехнические параметры высушиваемого материала (например, температуры во всех необходимых точках). Ко второй – показатели качества готового продукта, характеризующие цвет, запах, консистенцию и т.п. Третью группу составляют показатели, определяющие гранулометрический состав материала, механическую прочность, правильность геометрической формы и соблюдение размера.

В настоящее время большинство параметров, охватываемых системами управления сушильных установок, относится к первой группе. В основном измеряются и регулируются температуры теплоносителя, высушиваемого материала, расход теплоносителя. Реже измеряется и регулируется расход высушиваемых материалов. К основному параметру процесса сушки относится влагосодержание. Измерение влагосодержания теплоносителя не вызывает затруднений, а влагосодержание материала требует применения специальных средств.

Для измерения показателей второй и третьей групп пока не существует достаточно надежных и точных способов непрерывного контроля, что препятствует их использованию в схемах автоматизации сушильных установок, поэтому часто используется температура материала или газов на выходе из установки.

В распылительных сушилках с фонтанирующим и кипящим слоем сушильным агентом часто служат топочные газы, разбавляемые вторичным воздухом до необходимой температуры. В настоящее время все шире начинают применяться комбинированные установки, предназначенные для совмещения в одном агрегате процессов сушки и грануляции, сушки и дегидратации, сушки и классификации и т.п. Данные типы сушилок являются объектами с взаимосвязанными параметрами. Наиболее сложным представляется случай, когда инерционности перекрестных и основных связей близки. При автоматизации таких сушилок обычно принимаются гипотезы идеального смешения материала и изотермичности.

Для аэрофонтанной сушилки непрерывного действия основной регулируемой величиной служит температура в фонтанирующем слое, аналогично температуре кипящего слоя в сушилках псевдооживленного слоя. Управляющим воздействием во многих схемах управления является изменение подачи тепла на подогрев теплоносителя. Однако выбор управляющих воздействий, – нетривиальный процесс, что объясняется наличием взаимосвязанных параметров.

Рассмотрим математическую модель, описывающую процесс сушки в аппаратах с фонтанирующим слоем. Сушилка представляет собой конический аппарат, внутрь которого засыпаются частицы влажного материала. Снизу подается горячий воздух со скоростью, при которой он пробивает слой и образует фонтан (струю). Влажные частицы вовлекаются в фонтан и при движении в нем подсушиваются. На верхнем участке фонтана скорость уменьшается, и частицы падают

сверху на слой. Так как аппарат имеет коническую форму, частицы вдоль стенок постепенно смещаются вниз, подхватываются струей и т.д.

Для вывода математической модели примем следующие допущения:

- в каждый момент времени частицы попадают в струю у ее основания с влажностью, равной влажности слоя, и находятся в ней одинаковое время;
- время нахождения частиц в струе намного меньше, чем в слое;
- влажность частиц в слое одинаковая;
- большая часть влаги испаряется в струе, а испарение в слое незначительно либо им вовсе можно пренебречь;
- равновесное влагосодержание близко к нулю.

При данных допущениях можно выделить в аппарате две зоны, отличающиеся по процессам, протекающим в них, – зоны слоя и струи, взаимодействие которых показано на рис. 1, здесь W_H, W_1, W_2 – влагосодержание частицы начальное, в фонтане и слое соответственно; $N_1, N_2, N_{01}, N_{02}, N_{\text{вых}}$ – число частиц, вовлекаемых в фонтан из слоя, в слое, подающихся в струю, подающихся в слой и выгружаемых соответственно; K_1, K_0 – коэффициенты скорости сушки в фонтане и слое соответственно.

Опишем изменения влагосодержания в каждой зоне следующими уравнениями:

$$dW_1/dt = -K(N_1W_1 + N_{01}W_H)/(N_1 + N_{01}); \quad W_1(t) = W_2;$$

$$dW_2/dt = ((N_1 + N_{01})W_1 - (N_1 + N_{\text{вых}})W_2 + N_{02}W_H - K_0N_2W_2)/N_2; \quad W_2(0) = W_H.$$

На рисунке 2 представлены результаты моделирования для периодической сушки при $N_1 = 350; N_2 = 125\,000; N_{01}, N_{02}, N_{\text{вых}} = 0; K_0 = 0,1; K_1 = 0,4; W_H = 0,8$.

Рассмотренная математическая модель может быть использована для поиска оптимальных управляющих воздействий.

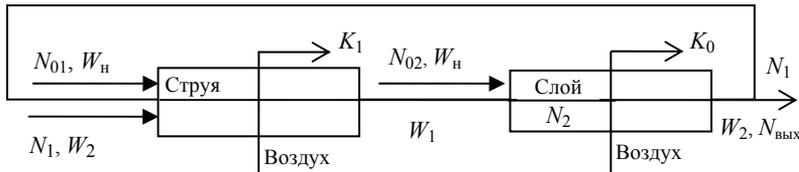


Рис. 1. Взаимодействие зон слоя и струи

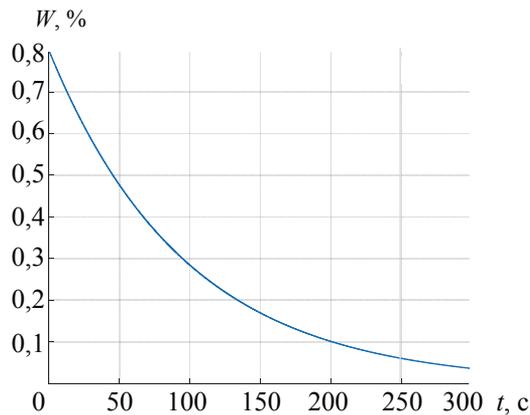


Рис. 2. Изменение влагосодержания частиц в слое $W, \%$, от времени $t, с$

Формирование математической модели процесса плавления в дуговой сталеплавильной печи

Типичная особенность горения дуг в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) состоит в непрерывном изменении их формы, размеров и, соответственно, параметров электрического режима работы печи. Возникает задача рационального использования выделяемой мощности для нагрева и плавления материалов. Однако ее решение представляет большую сложность [9 – 11]. Для снижения энергопотребления, а также повышения качества производимой стали необходимо использование новейших систем управления.

Практика промышленного использования ДСП переменного тока показывает, что изменение электрического режима печи возможно двумя путями: изменениями длины дуги и вторичного напряжения.

Изменение вторичного напряжения трансформатора, подаваемого на печь, осуществляется периодически, в определенные моменты плавки, однако частые коммутации силовых цепей нежелательны. Длину дугового промежутка можно изменять оперативно.

Поскольку изменение длины дугового промежутка приводит к изменению силы тока и напряжения, то данные величины используются как параметры регулирования. Необходимо помнить, что напряжение, в свою очередь, зависит и от положения ступени печного трансформатора. При этом переключение ступеней реактора выделяют как дополнительное управляющее воздействие, которое широко применяется на современных дуговых печах. Переключение ступеней реактора позволяет вводить дополнительную индуктивность в подводящих цепях печи. Реактор входит в состав печного трансформатора, и с помощью переключения ступеней можно изменять его внешнюю характеристику. Это оказывает влияние на коэффициент мощности.

Рассматриваемая печь, как объект управления, может быть представлена следующей структурной схемой (рис. 3).

К переменным, характеризующим состояние процесса, относятся:

– к вектору регулируемых величин: I – сила тока дуги, А; U_{ϕ} – напряжение фазы печи, В;

– вектору регулирующих воздействий: L – длина дуги, м; $U_{\text{в}}$ – вторичное напряжение трансформатора, В;

– вектору возмущающих воздействий: A – обвал шихты (изменение геометрии поверхности под дугой); B – обгорание электродов (изменение геометрии поверхности над дугой); C – кипение металла (изменение геометрии поверхности под дугой); D, E – составы соответственно вводимых присадок и шихты (изменение электропроводности атмосферы в подэлектродной зоне).

Процесс выплавки стали включает в себя не только задачи по поддержанию горения дуги, но и другие служебные функции, обеспечивающие работу ДСП.

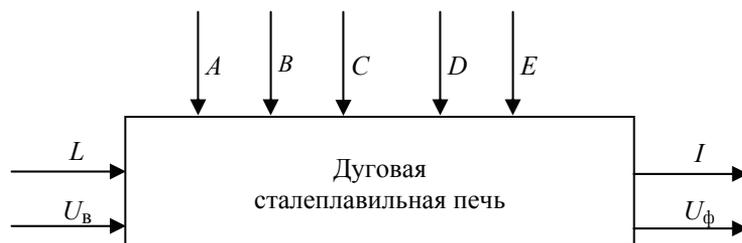


Рис. 3. Структурная схема дуговой сталеплавильной печи переменного тока

Выполнение требований эффективного управления процессом выплавки возможно только при наличии математической модели, описывающей процессы, происходящие в ДСП. Такая модель необходима для анализа влияния возмущающих и управляющих воздействий на выходные величины и способствует оперативному построению прогнозов поведения объекта при определенной стратегии управления.

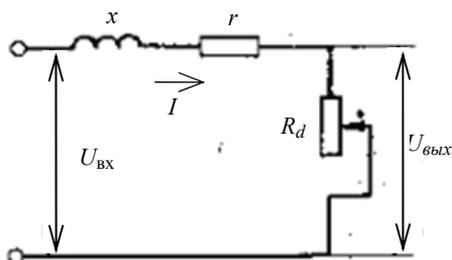


Рис. 4. «Рабочая» схема замещения электропечной установки

Для рассмотрения процесса воспользуемся схемой замещения электрической цепи однофазной дуги с соответствующими активными и индуктивными сопротивлениями. Наибольшую сложность использования схем замещения при моделировании представляет математическое описание поведения электрической дуги. Дуга представляется переменным активным сопротивлением. Данное допущение возможно и активно используется, однако такой подход не способен учесть нелинейные свойства дуги и предполагает наличие синусоидального тока, что вводит значительные погрешности. Приведем модели, учитывающие нелинейные свойства дуги и позволяющие отследить разные периоды горения дуги

$$\frac{dg_k}{dt} = \frac{1}{\Theta} \left(\frac{i_k^2}{U_k^2 g_k} - g_k \right), \quad (1)$$

где Θ – «постоянная времени» проводимости дуги; i_k – мгновенное значение тока дуги, А; U_k – действующее значение напряжения на дуге, В; g_k – проводимость дуги.

Основываясь на вышеизложенном, схема замещения может быть преобразована к «рабочему» виду, представленному на рис. 4. Преобразованная «рабочая» схема в данном случае включает в себя сопротивления трансформатора x и короткой сети r ; ток дуги I ; входное $U_{вх}$ и выходное $U_{вых}$ напряжения; сопротивление дуги R_d , а также модель дуги (1).

Цель моделирования – выявление управляющих воздействий, обладающих наибольшим влиянием на состояние системы, и характерных зависимостей входных и выходных координат и формирование на основе их анализа технологических рекомендаций по ведению процесса. На рис. 5 изображены динамические характеристики для несинусоидальных кривых среднеквадратичных действующих значений тока.

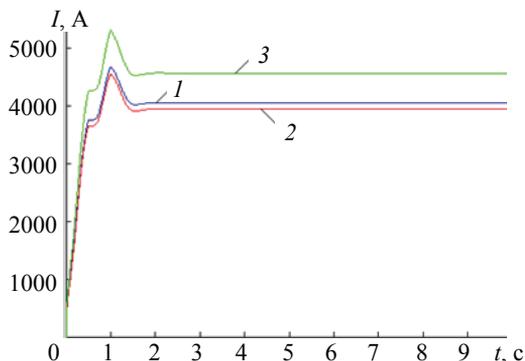


Рис. 5. Динамические характеристики горения дуги:

1 – номинальный режим; 2, 3 – при изменениях на 20 % длины дуги и вторичного напряжения соответственно

Анализ динамических характеристик показывает, что наибольшее отклонение от номинального режима произошло с изменением вторичного напряжения. Исходя из этого, в качестве управляющего воздействия можно выбрать изменение вторичного напряжения.

Заключение

Разработан подход к построению математических моделей многосвязных объектов управления, состоящий в переходе от качественных зависимостей между переменными объекта к структурированной формализации задачи. На основе данной методики разработаны математические модели процессов сушки дисперсий и плавления в дуговой сталеплавильной печи. Модели позволяют проводить имитационные исследования, поддерживать основные параметры производственного процесса, обеспечивать управление производством по выбранным критериям и повышать его эффективность за счет своевременных управляющих воздействий.

Список литературы

1. Битюков, В. К. Качественный анализ функционирования сетевой системы управления с конкурирующим методом доступа / В. К. Битюков, А. Е. Емельянов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 1. – С. 38 – 46.
2. Битюков, В. К. Обобщенная математическая модель сетевой системы управления с конкурирующим методом доступа / В. К. Битюков, А. Е. Емельянов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 2. – С. 319 – 326.
3. Дякин, В. Н. Динамическая модель управления развитием промышленного предприятия / В.Н. Дякин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 2. – С. 304 – 308.
4. Оневский, П. М. Автоматизация технологических процессов и производств / П. М. Оневский, В. А. Погонин, С. А. Скворцов. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 216 с.
5. Технические средства автоматизации: программно-технические комплексы и контроллеры : учеб. пособие / И. А. Елизаров [и др.]. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 180 с.
6. Парсункин, Б. П. Расчеты систем автоматической оптимизации управления технологическими процессами в металлургии / Б. Н. Парсункин, М. В. Бушманова, С. М. Андреев. – Магнитогорск : Изд-во МГТУ им. Г. И. Носова, 2003. – 267 с.
7. Пахомова, Ю. В. Особенности механизма и кинетики сушки капель дисперсий (на примере сушки послеспиртовой барды) / Ю. В. Пахомова, В. И. Коновалов, А. Н. Пахомов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 70 – 82.
8. Коновалов, В. И. Геометрия, циркуляция и тепломассоперенос при испарении капли на подложке / В. И. Коновалов, А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 371 – 387.
9. Рябов, А. В. Современные способы выплавки стали в дуговых печах : учеб. пособие / А. В. Рябов, И. В. Чуманов, М. В. Шишимиров. – М. : Теплотехник, 2007. – 192 с.
10. Smolyarenko, V. D. Modern Status and Development of Eaf for Steelmaking / V. D. Smolyarenko, S. G. Ovchinnikov, B. P. Chernyakhovskij // Сталь. – 2005. – № 2. – С. 47 – 51.
11. Управление режимом плавки в дуговой электропечи переменного тока с целью защиты холодильников стен печи / М. Кнооп [и др.] // Черные металлы. – 1997. – № 7. – С. 8 – 13.

Mathematical Models of Multiply-Connected Control Objects

M. N. M. Saif, V. G. Matveykin,
B. S. Dmitrievsky, A. V. Bashkatova, A. A. Mamontov

*Department of Information Processes and Control,
TSTU, Tambov, Russia; dmiboris@yandex.ru*

Keywords: mathematical model; control object; control system; steelmaking control furnace; drying installation.

Abstract: The article deals with the theoretical and methodological basis of the construction of mathematical models of multiply-connected control objects. The compilation of a mathematical model is made on the basis of the available ideas about the specific type of qualitative dependencies between object variables, taking into account the conditions that must be met when solving the control problem. The results of the study are presented graphically in the form of a structural scheme for the formalization of the problem. A mathematical model was formed taking into account the identified structure of the object. The processes of dispersion drying and melting processes in an electric arc furnace were considered as examples.

References

1. Bityukov V.K., Yemel'yanov A.Ye. [Qualitative analysis of the functioning of a network management system with a competing access method], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 1, pp. 38-46. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Bityukov V.K., Yemel'yanov A.Ye. [A generalized mathematical model of a network control system with a competing access method], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 2, pp. 319-326. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Dyakin V.N. [Dynamic model of industrial enterprise development management], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 2, pp. 304-308. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Onevskiy P.M., Pogonin V.A., Skvortsov S.A. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv* [Automation of technological processes and production], Tambov: Izdatel'stvo FGBOU VPO "TGTU", 2012, 216 p. (In Russ.)
5. Yelizarov I.A., Martem'yanov Yu.F., Skhirtladze A.G., Frolov S.V. *Tekhnicheskiye sredstva avtomatizatsii: programmno-tekhnicheskiye komplekсы i kontrolyery: uchebn. posobiye* [Technical means of automation: software and hardware systems and controllers: training. manual], Moscow: Mashinostroyeniye-1, 2004, 180 p. (In Russ.)
6. Parsunkin B.P., Bushmanova M.V., Andreyev S.M. *Raschety sistem avtomaticheskoy optimizatsii upravle-niya tekhnologicheskimi protsessami v metallurgii* [Calculations of automatic optimization systems for controlling technological processes in metallurgy], Magnitogorsk: Izdatel'stvo MGTU im. G. I. Nosova, 2003, 267 p. (In Russ.)
7. Pakhomova Yu.V., Konovalov V.I., Pakhomov A.N. [Peculiarities of the mechanism and kinetics of drying dispersion droplets (by the example of post-alcohol bards drying)], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 1, pp. 70-82. (In Russ., abstract in Eng.)

8. Konovalov V.I., Pakhomov A.N., Pakhomova Yu.V. [Geometry, circulation and heat and mass transfer during evaporation of a droplet on a substrate], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 2, pp. 371-387. (In Russ., abstract in Eng.)

9. Ryabov A.V., Chumanov I.V., Shishimirov M.V. *Sovremennyye sposoby vyplavki stali v dugovykh pechakh: uchebn. posobiye* [Modern methods of steel smelting in arc furnaces: training. manual], Moscow: Teplotekhnika, 2007, 192 p. (In Russ.)

10. Smolyarenko V.D., Ovchinnikov S.G., Chernyakhovskij B.P. Modern Status and Development of Eaf for Steelmaking, *Stal'* [Steel], 2005, no. 2, pp. 47-51. (In Russ.)

11. Knoop M., Likhterbek R., Kele Z., Zing Yu. [Controlling the smelting mode in an AC electric arc furnace in order to protect the wall furnace refrigerators], *Chernyye metally* [Black metals], 1997, no. 7, pp. 8-13. (In Russ.)

Mathematische Modelle von mehrfach verbundenen Steuerobjekten

Zusammenfassung: Der Artikel ist den theoretischen und methodologischen Grundlagen der Konstruktion der mathematischen Modelle der mehrfach verbundenen Steuerobjekte gewidmet. Die Erstellung eines mathematischen Modells erfolgt auf der Grundlage der vorhandenen Vorstellungen von der konkreten Art der qualitativen Abhängigkeiten zwischen Objektvariablen und berücksichtigt die Bedingungen, die bei der Lösung des Steuerungsproblems erfüllt sein müssen. Die Ergebnisse der Studie sind grafisch in Form eines Strukturschemas bei der Formalisierung der Aufgabe dargestellt. Das mathematische Modell wird unter Berücksichtigung der identifizierten Struktur des Objekts gebildet. In dem Artikel werden als Beispiele die Prozesse der Dispersionstrocknung und Schmelzprozesse in einem Elektrolichtbogenofen betrachtet.

Modèles mathématiques des objets à multiples liens de la commande

Résumé: L'article traite des bases de la construction théorique et méthodologique des modèles mathématiques des objets de contrôle multidirectionnels. La rédaction d'un modèle mathématique est faite à la base des représentations concernant le type concret des dépendances entre les variantes des objets en tenant compte des conditions qui doivent être respectées lors de la résolution de la tâche de la commande. Les résultats de l'étude sont présentés graphiquement sous la forme d'un schéma structurel lors de la formalisation d'une tâche. Le modèle mathématique est formé compte tenu de la structure de l'objet. L'article décrit les processus de séchage des dispersions et les processus de fusion dans le four à arc-en-fusion.

Авторы: *Саиф Марван Номан Мохаммед* – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление»; *Матвейкин Валерий Григорьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные процессы и управление»; *Дмитриевский Борис Сергеевич* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Информационные процессы и управление»; *Баикатова Александра Владимировна* – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление»; *Мамонтов Андрей Александрович* – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Погонин Василий Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ БУФЕРИЗАЦИИ ДАННЫХ НА КАЧЕСТВО УПРАВЛЕНИЯ В СЕТЕВЫХ СИСТЕМАХ

И. А. Авцинов¹, А. Е. Емельянов¹, М. Н. Ивлиев²

*Кафедры: информационных и управляющих систем (1);
высшей математики и информационных технологий (2),
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет
инженерных технологий», г. Воронеж, Россия; max1m@mail.ru*

Ключевые слова: вероятность передачи данных; дискретный регулятор; контроллер; сетевая система управления; сетевой канал; система управления; такт квантования.

Аннотация: Проведено имитационное моделирование системы управления с сетевым каналом передачи информации. Исследовано влияние процесса буферизации данных на качество управления для систем с бесконечно большим буфером. Моделирование функционирования цифровой и сетевых систем управления проводилось в среде Simulink системы MATLAB. Сделан вывод, что несмотря на наличие бесконечно большого буфера в цифровой системе управления может накапливаться запаздывание, приводящее к потере устойчивости системы в целом.

Значительное число научных работ посвящено анализу, моделированию и синтезу технических систем с вероятностными каналами передачи данных [1 – 5]. Как правило, в качестве таких каналов выступают цифровые сети (промышленные и общедоступные), по которым информация передается в виде пакетов данных [6 – 8]. Данные каналы передачи получили название сетевых, а системы – *сетевые системы управления* (Networked Control System – NCS) [9, 10]. Применение сетевых каналов в системах управления имеет ряд преимуществ: снижение затрат на монтажные работы, упрощенное конфигурирование системы, простота диагностики и обслуживания. Однако использование таких каналов передачи создает и ряд новых проблем, игнорирование которых может привести к потере устойчивости системы управления: случайная временная задержка в процессе передачи, вероятная потеря пакета данных, возможность асинхронной работы элементов системы.

Традиционный подход к синтезу таких систем не позволяет решить данные проблемы, так как анализ систем управления с сетевыми каналами передачи информации требует использования методов и подходов как теории управления, так и теории связи, что значительно усложняет анализ, моделирование и синтез таких систем управления [10].

В работе проведено исследование влияния буферизации данных на качество управления для систем с бесконечно большим буфером.

На рисунке 1 представлена схема системы управления с сетевым каналом связи и буферами для пакетов данных.

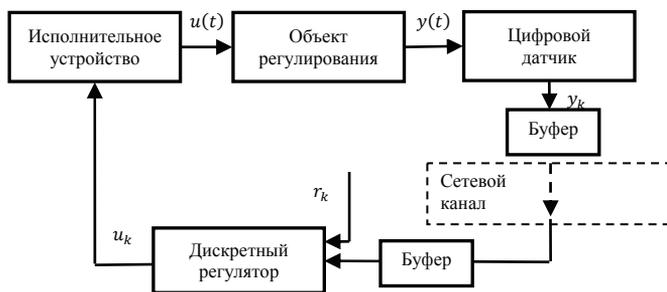


Рис. 1. Система управления с сетевым каналом связи и буферами для пакетов данных

Система работает следующим образом. Цифровой датчик считывает выходной сигнал объекта регулирования $y(t)$ в моменты времени $t = kT_0$, где T_0 – такт квантования цифровым датчиком выхода объекта регулирования.

Если канал «открыт», то цифровой датчик сразу передает данные $y(kT_0)$ на контроллер; если канал «закрит», то есть передача данных по нему в течение такта квантования T_0 невозможна, то пакет данных помещается в буфер. Таким образом, если канал будет «закрит» продолжительное время в течение нескольких тактов квантования T_0 , то в буфере датчика будет находиться соответствующее количество пакетов данных. Будем считать, что как только сетевой канал будет «открыт», то есть передача данных по нему станет возможной, все пакеты данных из буфера датчика будут перемещены в буфер контроллера. Контроллер последовательно обрабатывает поступающие данные от датчика: в момент времени $t = kT_0$ обрабатывается только один пакет данных, который поступил первым, остальные находятся в очереди. Объемы буферов датчика и контроллера считаются неограниченными. Предполагается, что датчик и контроллер работают синхронно: квантование датчика и контроллера осуществляется с одинаковым тактом квантования T_0 в один и тот же момент времени $t = kT_0$.

Контроллер вырабатывает регулирующее воздействие $u(kT_0)$ по определенному закону с учетом задающего воздействия $r(kT_0)$ и полученных данных от датчика $y(kT_0)$. Регулирующее воздействие $u(kT_0)$ передается на исполнительное устройство в моменты времени $t = kT_0$. Регулирующее воздействие $u(t)$ реализуется исполнительным устройством на объекте регулирования.

В дальнейшем дискретные переменные $y(kT_0)$, $u(kT_0)$, $r(kT_0)$ и др. для упрощения записи будем представлять в виде: y_k, u_k, r_k .

Для простоты считаем, что характеристики цифрового датчика и исполнительного устройства не влияют на процесс регулирования системы. Поэтому примем, что цифровой датчик и исполнительное устройство соответствуют безынерционным элементам с единичным коэффициентом усиления. В качестве объекта регулирования выбран двигатель постоянного тока (сервопривод); в качестве контроллера – дискретный ПИД-регулятор. Имитационное моделирование функционирования цифровой системы управления проведено в среде Simulink системы MATLAB.

Для характеристики функционирования системы введем несколько определений. Сетевой канал является «закрытым», если передача данных по нему в течение такта квантования T_0 невозможна, и «открытым» – если передача данных в течение T_0 возможна. Запоздыванием в сетевом канале передачи данных назы-

вается промежуток времени, в течение которого передача данных по нему невозможна. По сути, запаздывание в сетевом канале передачи данных – это время, в течение которого канал является «закрытым». Запаздыванием в системе управления называется промежуток времени с момента формирования пакета данных в цифровом датчике до момента его переработки в дискретном регуляторе. Очевидно, что запаздывание в системе управления складывается из времени ожидания пакета данных в буферах цифрового датчика и дискретного регулятора до момента его обработки. Информационным потоком системы управления с сетевыми каналами связи называется поток данных, поступающих непосредственно на обработку от одних элементов системы к другим. При этом поступившие данные могут некоторое время находиться в буфере, ожидая своей очереди обработки элементом системы. Разрывом информационного потока называется событие, состоящее в том, что дискретный регулятор не имеет данных от цифрового датчика для выработки регулирующего воздействия. Временем разрыва информационного потока называется промежуток времени, в течение которого наблюдался разрыв информационного потока в системе управления. Система управления с сетевыми каналами связи является замкнутой, если в ней не наблюдается разрыва информационного потока; в противном случае система считается разомкнутой.

Таким образом, в процессе функционирования цифровой системы управления может возникнуть следующая ситуация: сетевой канал передачи данных «закрыт», но в свете введенного выше определения система управления будет считаться замкнутой, а информационный поток – непрерывным, если в буфере дискретного регулятора будут данные от цифрового датчика, которые еще не были обработаны.

В некоторый момент времени в системе может сложиться следующая ситуация:

- сетевой канал «закрыт»;
- буфер регулятора пуст;
- буфер датчика содержит пакеты данных от цифрового датчика.

При этом на следующем такте квантования:

- новые данные от цифрового датчика будут помещены в буфер датчика;
- регулятор для выработки регулирующего воздействия будет использовать последние полученные данные от цифрового датчика, которые были уже использованы.

Рассмотренный выше случай функционирования системы управления с сетевым каналом связи приводит к разрыву информационного потока, в результате время запаздывания в системе увеличится на время разрыва информационного потока.

Когда сетевой канал «открывается», то пакеты данных из буфера цифрового датчика в течение такта квантования T_0 перемещаются в буфер дискретного регулятора.

Анализ функционирования такой системы показывает, что разрыв информационного потока наблюдается, когда текущее время запаздывания в сетевом канале передачи данных становится больше времени запаздывания в системе управления, которое наблюдалось до этого момента времени. Другими словами, разрыв информационного потока наблюдается в том случае, когда число последовательных тактов квантования T_0 , в течение которых сетевой канал находится в состоянии «закрыт», превышает максимальное число аналогичных тактов, наблюдавшихся до этого момента времени.

На рисунке 2 представлена схема моделирования рассматриваемой системы, предусматривающая следующие устройства:

- 1) модуль формирования дискретного случайного процесса ξ_k «закрытия–открытия» сетевого канала.

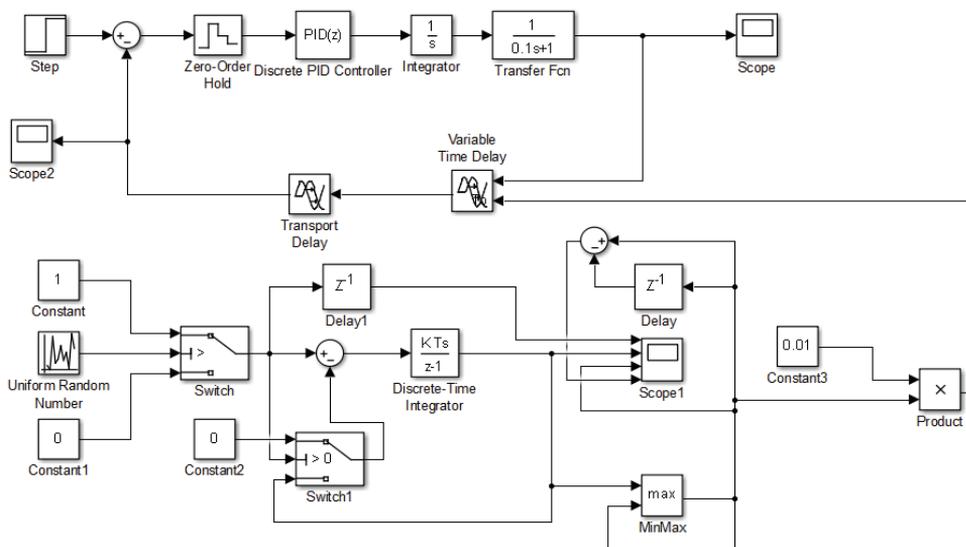


Рис. 2. Схема моделирования системы управления с бесконечно большим буфером

С этой целью в системе используется блок формирования случайного числа, имеющего равномерное распределение. Вероятность p задается путем установки соответствующего значения в управляемом переключателе Switch

$$\xi_k = \xi(kT_0) = \begin{cases} 1, & \text{канал закрыт – вероятность } p; \\ 0, & \text{канал открыт – вероятность } q = 1 - p; \end{cases}$$

2) модуль формирования числового значения времени закрытия канала передачи в тактах квантования.

В данном случае формируется дискретный случайный процесс

$$\varepsilon_{k+1} = (\varepsilon_k + 1)\xi_k,$$

где ε_k – число последовательных тактов квантования «закрытия» сетевого канала на момент времени $t = kT_0$.

Для реализации данного случайного процесса используется интегрирующий блок. Пока $\xi_k = 1$, выход интегратора возрастает; если $\xi_k = 0$, то выход интегратора обнуляется. Условие такого перехода задается в управляемом переключателе Switch;

3) модуль формирования максимального значения времени «закрытия» сетевого канала в тактах квантования за время работы системы управления.

С этой целью формируется дискретный случайный процесс

$$\varepsilon_{k+1}^{\max} = \varepsilon_{k+1} \cdot 1[\varepsilon_{k+1} - \varepsilon_k^{\max}] + \varepsilon_k^{\max} (1 - 1[\varepsilon_{k+1} - \varepsilon_k^{\max}]),$$

где ε_k^{\max} – максимальное значение времени «закрытия» сетевого канала в тактах квантования на момент времени $t = kT_0$; $1[\varepsilon_{k+1} - \varepsilon_k^{\max}]$ – единичная функция (значение 1, если $\varepsilon_{k+1} \geq \varepsilon_k^{\max}$, в противном случае – 0).

Для реализации данного случайного процесса используется блок MinMax. С этой целью формируется дискретный случайный процесс

$$z_k^p = \varepsilon_k^{\max} - \varepsilon_{k-1}^{\max}.$$

В момент, когда наступает разрыв информационного потока, $z_k^p = 1$ и это значение удерживается в течение всего времени разрыва.

Функционирование рассматриваемой системы управления моделируется следующим образом.

1. В цепи обратной связи имеются два элемента временной задержки: Transport Delay – предназначен для моделирования запаздывания на 1 такт квантования T_0 , что связано с особенностями сетевой системы управления; Variable Time Delay – для моделирования временной задержки, определяемой числом пакетов данных в буфере элементов системы.

2. В случае, если в системе не наблюдается разрыв информационного потока, система работает с постоянным запаздыванием в цепи обратной связи; если же разрыв есть, то значение запаздывания в блоке Variable Time Delay увеличивается как раз на это время.

3. В течение разрыва информационного потока система работает в разомкнутом состоянии; после окончания разрыва система работает с новым значением запаздывания в цепи обратной связи.

На рисунке 3, а, показан переходной процесс рассматриваемой системы управления при вероятности «закрытия» канала $P = 0,6$ и времени такта квантования $T_0 = 0,01$ с. Очевидно, что в этом случае система управления является неустойчивой – с течением времени амплитуда колебаний выходной величины объекта управления увеличивается.

Рисунок 3, в, дает информацию о работе системы в течение времени переходного процесса. Показано, в какие моменты канал находится в «открытом» состоянии, в какие – «закрытом»; как изменяется число тактов «закрытия» канала; в какие моменты времени имеется разрыв информационного потока системы. С течением времени запаздывание в системе управления, определяемое максимальным числом тактов «закрытия» канала или суммарным временем разрыва информационного потока, растет.

На рисунках 3, б, г, показаны соответственно переходной процесс и информация о работе рассматриваемой системы управления при вероятности «закрытия» канала $P = 0,4$ и времени такта квантования $T_0 = 0,01$ с. Из рисунка 3, б, можно заключить, что на данном отрезке времени система управления ведет себя как устойчивая: с течением времени амплитуда колебаний выходной величины систем уменьшается.

Однако если рассматривать более длительный промежуток времени (см. рис. 3, д), то можно увидеть, что с этими же параметрами система является неустойчивой: затухание колебаний с течением времени заканчивается, и амплитуда колебаний начинает увеличиваться. Следует отметить, что запаздывание в системе управления, как это видно из рис. 3, ж, по сравнению с рис. 3, г, не изменилось с увеличением времени переходного процесса.

На рисунке 3, е, показан переходной процесс, – рис. 3, и, – информация о работе рассматриваемой системы управления при вероятности «закрытия» канала $P = 0,2$ и времени такта квантования $T_0 = 0,01$ с. Из рисунка 3, е, следует, что на данном отрезке времени система управления ведет себя как устойчивая. Однако, как было установлено ранее для данной системы, с течением времени запаздывание в системе управления будет только увеличиваться, поэтому, рано или поздно, рассматриваемая система потеряет устойчивость.

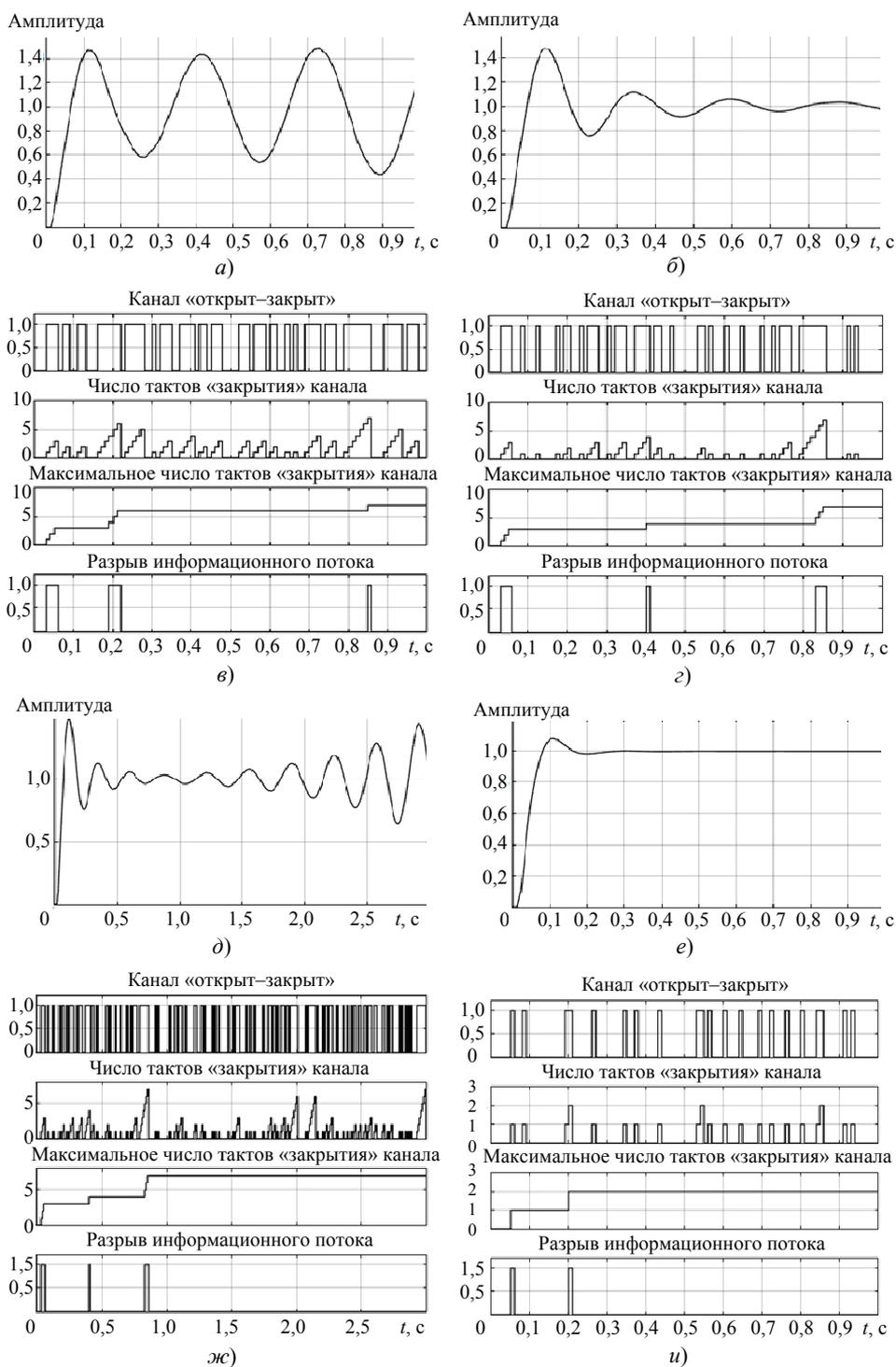


Рис. 3. Переходной процесс и информация о работе системы управления при времени такта квантования $T_0 = 0,01$ с и вероятности «закрытия» канала: $a, в - P = 0,6$; $б, г, д, ж - P = 0,4$; $е, и - P = 0,2$

Таким образом, проведенное в работе имитационное моделирование сетевой системы управления с бесконечно большим буфером для пакетов данных показало, что с течением времени в системе управления время запаздывания увеличивается, что рано или поздно может привести к потере устойчивости.

Список литературы

1. Абрамов, Г. В. Анализ времени передачи данных в распределенных сетях с конкурирующим доступом / Г. В. Абрамов, А. Е. Емельянов, К. Ч. Колбая // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Сер.: Системный анализ и информационные технологии. – 2016. – № 4. – С. 61 – 67.
2. Битюков, В. К. Модель канала передачи со случайной задержкой и потерей пакетов данных для сетевых систем управления / В. К. Битюков, А. Е. Емельянов // Вестн. Воронежского гос. ун-та инженерных технологий. – 2015. – № 3 (65). – С. 68 – 73.
3. Burger, M. Hierarchical Clustering of Dynamical Networks Using a Saddle-Point Analysis / M. Burger, D. Zelazo, F. Allgower // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2013. – Vol. 58, No. 1. – P. 113 – 124.
4. Chen, X. Periodic Event-Triggered State-Feedback and Output-Feedback Control for Linear Systems / X. Chen, F. Hao // International Journal of Control, Automation and Systems. – 2015. – Vol. 13, No. 4. – P. 779 – 787.
5. Fuhrmann, P. A. Reachability, Observability and Strict Equivalence of Networked Linear Systems / Fuhrmann P. A., Helmke U. // Mathematics of Control, Signals and Systems. – 2013. – Vol. 25, Issue 4. – P. 437 – 471.
6. Self-Triggered Linear Quadratic Control / T. Gommans [et al.] // Automatica. – 2014. – Vol. 50, No. 4. – P. 1279 – 1287.
7. Introduction to Feedback Control of Underactuated VTOL Vehicles: A Review of Basic Control Design Ideas and Principles / M.-D. Hua [et al.] // IEEE Control Systems. – 2013. – Vol. 33, No. 1. – P. 61 – 75. doi: 10.1109/MCS.2012.2225931
8. You, K.-Y. Survey of Recent Progress in Networked Control Systems / K.-Y. You, L.-H. Xie // Acta Automatica Sinica. – 2013. – Vol. 39, No. 2. – P. 101 – 117.
9. Cloud-Based Networked Visual Servo Control / H. Wu [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – Vol. 60. – P. 554 – 566.
10. Zhang, L. Network-Induced Constraints in Networked Control Systems / L. Zhang, H. Gao, O. Kaynak // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2013. – Vol. 9. – P. 403 – 416.

Investigating the Effect of Data Buffering on the Quality of Network Control Systems

I. A. Avtsinov¹, A. E. Emelyanov¹, M. N. Ivliev²

*Departments of Information and Control Systems (1);
Higher Mathematics and Information Technology (2),
Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia;
max1m@mail.ru*

Keywords: data transmission probability; discrete regulator; controller; network control system; network channel; control system; quantization tact.

Abstract: Simulation modeling of the control system with a network channel for transmitting information was carried out. The influence of the data buffering process on the quality of control for systems with an infinitely large buffer was investigated.

Simulation of the operation of digital and network control systems was carried out in the Simulink environment of the MATLAB system. It is concluded that, despite the presence of an infinitely large buffer, a delay may accumulate in the digital control system, leading to a loss of stability of the system as a whole.

References

1. Abramov G.V., Yemel'yanov A.Ye., Kolbaya K.Ch. [Analysis of data transmission time in distributed networks with competing access], *Vestnik Voronezhskogo gos. un-ta. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnyye tekhnologii* [Vestnik of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies], 2016, no. 4, pp. 61-67. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Bityukov V.K., Yemel'yanov A.Ye. [A model of a transmission channel with random delay and loss of data packets for network control systems], *Vestnik Voronezhskogo gos. un-ta inzhenernykh tekhnologiy* [Vestnik of Voronezh State University of Engineering Technology], 2015, no. 3 (65), pp. 68-73. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Burger M., Zelazo D., Allgower F. Hierarchical Clustering of Dynamical Networks Using a Saddle-Point Analysis, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, vol. 58, no. 1, pp. 113-124.
4. Chen X., Hao F. Periodic Event-Triggered State-Feedback and Output-Feedback Control for Linear Systems, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2015, vol. 13, no. 4, pp. 779-787.
5. Fuhrmann P.A., Helmke U. Reachability, Observability and Strict Equivalence of Networked Linear Systems, *Mathematics of Control, Signals and Systems*, 2013, vol. 25, issue 4, pp. 437-471.
6. Gommans T., Antunes D., Donkers T., Tabuada P., Heemels W. Self-Triggered Linear Quadratic Control, *Automatica*, 2014, vol. 50, no. 4, pp. 1279-1287.
7. Hua M.-D., Hamel T., Morin P., Samson C. Introduction to Feedback Control of Underactuated VTOL Vehicles: A Review of Basic Control Design Ideas and Principles, *IEEE Control Systems*, 2013, vol. 33, no. 1, pp. 61-75, doi: 10.1109/MCS.2012.2225931
8. You K.-Y., Xie L.-H. Survey of Recent Progress in Networked Control Systems, *Acta Automatica Sinica*, 2013, vol. 39, no. 2, pp. 101-117.
9. Wu H., Lou L., Chen C.-C., Hirche S., Kuhnlenz K. Cloud-Based Networked Visual Servo Control, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, vol. 60, pp. 554-566.
10. Zhang L., Gao H., Kaynak O. Network-Induced Constraints in Networked Control Systems, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, vol. 9, pp. 403-416.

Untersuchung der Auswirkungen der Pufferung von Daten auf die Qualität der Verwaltung in Netzwerksystemen

Zusammenfassung: Es ist eine Simulationsmodellierung des Steuerungssystems mit einem Netzwerkkanal zur Übertragung von der Information durchgeführt. Der Einfluss des Datenpufferprozesses auf die Steuerungsqualität für Systeme mit unendlich großem Puffer ist untersucht. Die Modellierung des Betriebs digitaler und Netzwerksteuerungssysteme wurde in der Simulink-Umgebung des MATLAB-Systems durchgeführt. Es ist eine Schlussfolgerung gezogen, dass sich trotz des Vorhandenseins eines unendlich großen Puffers eine Verzögerung im digitalen Steuersystem ansammeln kann, was zu einem Verlust der Stabilität des Gesamtsystems führt.

Étude de l'impact de la mise en mémoire tampon des données sur la qualité de la gestion dans les systèmes de réseau

Résumé: Est effectuée la simulation d'un système de contrôle avec un canal de transmission d'informations de réseau. Est étudié l'impact du processus de calcul des données sur la qualité de la gestion des systèmes avec un tampon infiniment grand. Est réalisée la simulation du fonctionnement des systèmes de contrôle numérique et ceux de réseau dans l'environnement Simulink du système MATLAB. Est faite la conclusion qu'en dépit de la présence d'un tampon infiniment grand, le système de la commande numérique peut accumuler un retard, ce qui entraîne une perte de la stabilité du système dans son ensemble.

Авторы: *Авцинов Игорь Алексеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры информационных и управляющих систем; *Емельянов Александр Егорович* – кандидат технических наук, доцент кафедры информационных и управляющих систем; *Ивлиев Максим Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики и информационных технологий, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», г. Воронеж, Россия.

Рецензент: *Кудряшов Владимир Сергеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры информационных и управляющих систем, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», г. Воронеж, Россия.

ОЦЕНКА ИНДИКАТОРА ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ И ВЫПОЛНЕНИЕ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

С. В. Пономарев¹, С. В. Мищенко¹,
Е. С. Мищенко², С. С. С. Аль-Бусаиди¹

*Кафедры: «Мехатроника и технологические измерения» (1);
«Менеджмент» (2), ФГБОУ ВО «ТГТУ»,
г. Тамбов, Россия; svronom@yahoo.com*

Ключевые слова: вероятность реализации; значимость последствий; индикатор возможности улучшения; система менеджмента качества.

Аннотация: Рассмотрены методические рекомендации по практическому применению балльных квалиметрических шкал для оценки показателя «Индикатор возможности улучшения» с последующим определением целей в области качества, планированием и выполнением проектов улучшения в системе менеджмента качества образовательной организации, базирующиеся на использовании двух показателей: вероятности реализации потенциального улучшения; значимости положительных последствий предполагаемого улучшения.

Введение

В работе [1] рассмотрено пять вариантов несовпадающих толкований понятий «риски» и «возможности», используемых в тексте стандарта ГОСТ Р ИСО 9001–2015. По мнению автора, многие специалисты в области менеджмента качества считают необходимым рассматривать понятия «риски» и «возможности» как два независимых и самостоятельных показателя. При этом характерна «контекстная и даже прямая привязка “рисков” к неблагоприятным событиям, а “возможностей” – к благоприятным» [1]. Однако в ряде случаев возможны ситуации, когда следует использовать и другие варианты толкования понятий «риски» и «возможности», изложенные в [1].

Для ситуаций, когда понятие «возможности» следует рассматривать отдельно от показателя «риски», в статье [2] показаны возможные подходы к построению квалиметрических шкал для оценки показателя «Индикатор возможности улучшения» (ИВУ). В данной работе, базирующейся на идеях статей [3, 4], изложены три подхода к оценке показателя ИВУ путем построения балльных квалиметрических шкал, основанных на использовании одного, двух или трех показателей: **ВР** – вероятность реализации потенциального улучшения [2 – 5]; **ЗП** – значимость положительных последствий предполагаемого улучшения [2 – 4, 6 – 8]; **ДКУ** – доступность (легкость) контроля и управления процессами после внедрения возможного улучшения [2 – 4, 9 – 11].

Согласно публикациям [1 – 22], представлен материал, который используется в системах менеджмента качества (СМК) образовательных организаций для оценок показателя ИВУ, базирующихся на применении ВР и ЗП.

1. Краткие сведения об опыте применения оценок рисков в системах менеджмента качества образовательных организаций

После вступления в силу стандарта ГОСТ Р ИСО 9001–2015 в статьях [12 – 14] и документах СМК образовательных организаций [15 – 17] достаточно широко представлены результаты работ, посвященных использованию балльных оценок показателей риска с последующим планированием и осуществлению предупреждающих действий в целях предотвращения негативных последствий рисков.

Нередко для оценки риска применяют единственный показатель «Вероятность реализации риска», в частности, о таких подходах к оценке рисков говорится в [3 – 5, 15].

Чаще всего для оценки рисков используют два показателя: O – вероятность реализации опасного фактора; S – тяжесть последствий от реализации опасного фактора с последующим анализом рисков по качественной диаграмме. Практическое осуществление такого подхода (по рекомендациям ХАССП-методологии [6], предусматривающей использование четырехбалльных шкал для показателей O и S) состоит в следующем:

1) экспертами-специалистами проводится балльная оценка первого показателя O , исходя из четырех возможных вариантов оценки в виде баллов:

- практически равный нулю (1);
- незначительный (2);
- значительный (3);
- высокий (4);

2) экспертами-специалистами осуществляется балльная оценка второго показателя S , исходя из четырех возможных вариантов оценки этого последствия (в виде приведенных ниже баллов):

- легкое (1);
- средней тяжести (2);
- тяжелое (3);
- критическое (4);

3) граница допустимого риска на качественной диаграмме с координатами в виде показателей: «вероятность реализации опасного фактора» – «тяжесть последствий» по рекомендациям [6] задается так, как указано на рис. 1;

4) для рассматриваемого опасного фактора на диаграмму наносят точку с координатами O и S , оцененными экспертами. В случае если точка лежит на границе или выше – оцененный фактор является опасным, если ниже – не опасным.

Таким образом, риск представляется (см. рис. 1) некоторой точкой на плоскости с координатами $P(O, S)$, где P – риск.

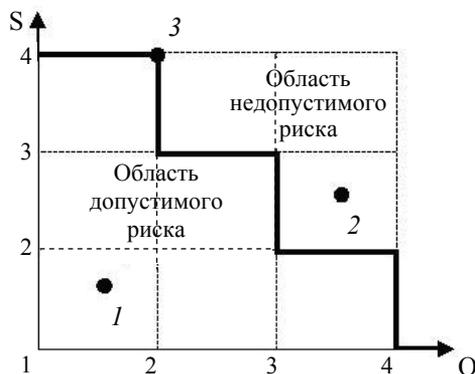


Рис. 1. Диаграмма анализа рисков [6]

На рисунке 1 на плоскости с координатами O и S в соответствии с рекомендациями [6] нанесена граница допустимого риска. Выход на эту границу или за нее означает, что риск недопустим [6]. На рисунке 1 точка 1 лежит в области допустимого риска, 2 – недопустимого риска. Точка 3, лежащая на границе, также соответствует недопустимому риску при реализации опасного фактора или другой нежелательной ситуации.

Следует отметить, что в некоторых случаях для экспертной оценки значений показателей O и S используют квалиметрические балльные шкалы с большим числом градаций, например, пятибалльные, шестибалльные, а в некоторых случаях – вплоть до десятибалльных шкал. Примеры таких шкал приведены как в статье [12], в которой применяют пятибалльные шкалы для каждого показателя O и S , так и в работе [16], где используют пятибалльную шкалу для показателя O и шестибалльную для показателя S . В работах [7, 8] показатели O и S оценивают по десятибалльным квалиметрическим шкалам.

Вариантами таких балльных оценок рисков (в соответствии с рекомендациями ХАСПП-методологии [6]) может быть представление риска вектором $P(O, S)$ на плоскости с координатами P и S , или эквивалентным этому вектору комплексным числом $P = O + iS$ на комплексной плоскости.

Двухмерная оценка риска является, по-видимому, наиболее удобной и универсальной. Интерпретация риска как совокупности двух показателей приводится и в законе «О техническом регулировании». Согласно этому закону, «риск – вероятность причинения вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни или здоровью животных и растений с учетом тяжести этого вреда».

В работах [7, 8] приведен вариант проведения FMEA-анализа, при котором оценка приоритетного числа риска (ПЧР) проводится в виде произведения двух показателей

$$\text{ПЧР} = O \cdot S,$$

где O, S – оценки вероятности возникновения опасного фактора (дефекта) и значимости (тяжести) последствий от реализации опасного фактора соответственно, определяемые по десятибалльным шкалам [7 – 9].

В публикациях [3, 4, 10, 11, 17] для оценки рисков используются подходы FMEA-анализа [9], предусматривающего использование оценки имеющегося риска в виде приоритетного числа риска, вычисляемого по формуле

$$\text{ПЧР} = O \cdot S \cdot D,$$

где D – трудность обнаружения отказа или дефекта. Значения показателей O, S, D при этом определяют по десятибалльным шкалам, приведенным в [9].

2. Методические рекомендации по применению двух показателей при оценке индикатора возможности улучшения

По аналогии с ХАСПП-методологией [6] предлагаем использовать следующий подход при оценке ИВУ с применением сочетания двух показателей, предусматривающий следующий порядок действий:

1) экспертами-специалистами проводится балльная оценка первого показателя BP с использованием пятибалльной квалиметрической шкалы:

- 1 – очень низкая (вероятность реализации не более 10 %);
- 2 – низкая (10 – 35 %);
- 3 – средняя (35 – 65 %);
- 4 – высокая (65 – 90 %);
- 5 – очень высокая (90 – 100 %);

2) экспертами-специалистами осуществляется балльная оценка второго показателя ЗП с применением пятибалльной квалиметрической шкалы:

1 – очень маленькая (затраты окупаются более чем за 7 лет);

2 – небольшая (5 – 7 лет);

3 – существенная (3 – 5 лет);

4 – большая (1 – 3 года);

5 – очень большая (быстрее чем за 1 год);

3) класс (ранг) искомой оценки ИВУ для каждого рассматриваемого варианта улучшения (по назначенным экспертами-специалистами балльным оценкам показателей ВР и ЗП) определяют с применением матрицы вероятности и значимости последствий улучшения (табл. 1).

4) для каждого варианта рассматриваемых возможных улучшений процессов СМК образовательной организации по данным матрицы-таблицы 1 определяют ранги ИВУ. При этом находят ячейку, располагающуюся на пересечении строки (соответствующей назначенной экспертами величине показателя ВР) и столбца (соответствующего определенной экспертами балльной оценке показателя ЗП) и в этой ячейке считывают значение (уровень) ранга полученной оценки ИВУ для рассматриваемого варианта улучшения деятельности в анализируемом процессе СМК.

Таблица 1

Матрица вероятности реализации и значимости последствий улучшений

ЗП ВР, %	Затраты окупаются					
	более 7 лет	5 – 7 лет	3 – 5 лет	1 – 3 года	меньше, чем за 1 год	
	баллы	1	2	3	4	5
90 – 100	5	II	III	IV	V	V
65 – 90	4	II	II	III	IV	V
35 – 65	3	I	II	II	III	IV
10 – 35	2	I	I	II	II	III
0 – 10	1	I	I	I	II	II

I – очень низкий ранг анализируемого варианта улучшения. Данный вариант не включают в состав целей в области качества (ЦвОК) и не рассматривают при планировании мероприятий по улучшению деятельности;

II – низкий ранг анализируемого варианта улучшения. Этот вариант после анализа может быть включен в состав ЦвОК и рассмотрен при планировании мероприятий по улучшению деятельности на уровне кафедр;

III – средний ранг анализируемого варианта улучшения, который анализируют и часто включают в состав ЦвОК и планы мероприятий по улучшению деятельности процессов на уровне кафедр, факультетов и институтов;

IV – высокий ранг анализируемого варианта улучшения. Данный вариант обязательно анализируют и включают в состав ЦвОК и планы мероприятий по улучшению процессов на уровне кафедр, факультетов, институтов и проректоров;

V – очень высокий ранг анализируемого варианта улучшения. Этот вариант анализируют и обязательно включают в состав ЦвОК и планы мероприятий по улучшению деятельности в процессах на уровне кафедр, факультетов, институтов, проректоров и ректора.

При этом (на следующем этапе деятельности по реализации имеющихся возможностей улучшения) используют представленные в нижней части матрицы-таблицы 1 рекомендации по включению рассматриваемого варианта улучшения анализируемого процесса СМК образовательной организации в состав целей в области качества и планы мероприятий по достижению этих целей.

Рассмотренный выше подход к оценке искомого уровня (класса, ранга) ИВУ, по-видимому, является наиболее удобным и универсальным. Интерпретация данного индикатора как совокупности двух показателей ВР и ЗП позволяет ввести следующее определение: ИВУ – «*вероятность реализации ВР потенциального улучшения*» с учетом «*значимости положительных последствий ЗП предполагаемого улучшения*».

По аналогии с результатами, изложенными в первом разделе статьи и в работах [7, 8], для оценки величины ИВУ в статье [2] предложено использовать приоритетное число возможности улучшения (ПЧВУ), вычисляемое по формуле $ПЧВУ = ВР \cdot ЗП$.

На практике балльные оценки показателей ВР и ЗП могут быть успешно получены с использованием десятибалльных квалиметрических шкал, приведенных в статье [2].

При практическом проведении работ в целях выявления рисков и/или возможностей улучшения деятельности в процессах СМК образовательной организации можно рекомендовать использовать следующие относительно простые инструменты анализа, контроля и управления качеством [10, 11]:

1) причинно-следственную диаграмму; 2) диаграмму Парето; 3) стратификацию (расслаивание); 4) диаграмму разброса; 5) методы описательной статистики (графики, гистограммы, диаграммы); 6) анализ возможностей процесса (статистическое управление процессами (SPC)); 7) регрессионный анализ; 8) анализ трендов, а также ряд более сложных комплексных инструментов и методов менеджмента качества [10, 11, 17 – 21]; 9) ABC-анализ; 10) SWOT-анализ; 11) FMEA-анализ; 12) IOMEA-анализ [20]; 13) QFD-анализ; 14) ранговую оценку риска/возможности [17].

3. Принятие управленческих решений об использовании имеющихся возможностей улучшения деятельности

Как только команда экспертов-специалистов провела оценку ранга (класса) нескольких вариантов улучшения деятельности в анализируемых процессах СМК и выбрала самый перспективный вариант, отчет о результатах выполненной работы (содержащий технико-экономическое обоснование целесообразности осуществления улучшения и сведения о предстоящих затратах финансовых, материальных и человеческих ресурсов) представляется на рассмотрение непосредственному руководителю, являющемуся владельцем рассматриваемого процесса в образовательной организации, например, заведующему кафедрой, начальнику отдела, декану, директору института, проректору или ректору.

Владелец процесса, выступающий в качестве лица, принимающего решение, после обсуждения и анализа представленных ему материалов о возможности осуществления предлагаемого улучшения деятельности в конкретном процессе СМК, принимает решение либо о включении рассматриваемого предложения в состав ЦвОК и план мероприятий по достижению целей, либо о необходимости более детальной проработки проекта, предлагаемого командой специалистов-экспертов.

После предварительного утверждения проекта, предложенного командой специалистов-экспертов, ответственное лицо принимает решение о выделении необходимого объема ресурсов из имеющегося у него бюджета финансовых и материальных средств, то есть выступает еще и в качестве спонсора при выполнении последующих мероприятий по осуществлению проекта улучшения.

Чаще всего, по распоряжению спонсора формируют новую (вторую) команду для разработки плана мероприятий и последующего выполнения работ по осуществлению предложенного первой командой проекта улучшения. Реже разработку плана мероприятий и дальнейшее проведение работ по внедрению проекта улучшения поручают первой команде. Результаты работы второй команды, занимавшейся составлением плана мероприятий по осуществлению проекта улучшения деятельности в СМК (после утверждения спонсором и выделения им необходимых ресурсов), принимаются к исполнению, как правило, силами этой же команды.

После завершения работ по выполнению проекта улучшения, члены второй команды проводят оценку результативности и эффективности своей работы в соответствии с рекомендациями [20, 22], разрабатывают документы (рабочие инструкции, документированные процедуры, методические рекомендации и/или стандарты организации), определяющие порядок осуществления деятельности в новом (улучшенном) процессе, а также составляют отчет о результатах выполнения проекта с целью сохранить накопленный опыт и сделать его доступным другим подразделениям и членам образовательной организации.

Кроме того, члены команды и спонсор выполненного проекта должны обсудить и рассмотреть возможности использования выработанного проектного решения для целей улучшения результативности и эффективности деятельности и в других подразделениях образовательной организации.

4. Применение разработанных рекомендаций при решении задач улучшения профориентационной работы в Тамбовском государственном техническом университете

В августе 2009 г. по предварительным итогам набора студентов на первый курс обучения стала очевидной необходимость осуществить реинжиниринг профориентационной работы как с предприятиями-работодателями, школами, учреждениями начального профессионального образования (УНПО), средними специальными учебными заведениями (ССУЗ), так и непосредственно со школьниками, учащимися УНПО, ССУЗов, родителями и членами семей потенциальных абитуриентов.

В сентябре 2009 г. ректор сформировал команду для выработки предложений по формированию программы улучшения профориентационной работы. Возглавил работу команды ректор. В состав команды были включены проректоры, деканы факультетов, директора отделения довузовского образования и института дистанционного образования, а также группа специалистов по использованию инструментов и методов менеджмента качества.

Руководитель команды – ректор технического университета – поручил группе специалистов по использованию инструментов и методов менеджмента качества подготовить план действий по проведению SWOT-анализа.

После выявления сильных и слабых сторон внутренней деятельности, а также возможностей и угроз из внешней среды, предстояло выработать предложения о том, каким образом можно использовать имеющиеся внутренние сильные стороны и возможности, предоставляемые окружающей средой, для преодоления имеющихся внутренних слабостей и нейтрализации угроз со стороны внешней среды.

После завершения этого этапа работы предстояло выработать проект плана мероприятий по улучшению профориентационной работы в университете.

Членами группы специалистов по использованию инструментов и методов менеджмента качества готовились методические рекомендации по проведению SWOT-анализа, которые затем рассылались всем членам сформированной команды. После получения результатов первого этапа SWOT-анализа, представленных

членами команды, отделом управления качеством (ОУК) выполнялась работа по обработке и упорядочению полученных предложений, сформулированных членами команды. В итоге были сформированы четыре формы-списка, содержавшие обобщающие сведения о предложениях членов команды. При этом предложение, стоявшее в каждом списке на первом месте, как правило, было сформулировано 12 – 15 членами команды. В конце списка располагались предложения, высказанные только отдельными членами команды (в том числе, и в единственном числе).

Результаты обобщения предложений членов команды, выполненные сотрудниками ОУК, представлялись руководителю команды. В рамках подготовки к проведению совещания (по указанию руководителя команды) каждый член команды получал обобщенные формы-списки, содержавшие следующие сведения:

- перечень предложений в порядке убывания частоты их поступления;
- кем были сформулированы конкретные предложения (в виде перечисления номеров членов команды по ранее разосланному списку команды, непосредственно после формулировки каждого предложения);
- кроме того, после формулировки каждого предложения, обозначалось общее число членов команды, высказавших данное предложение.

Главным обсуждавшимся вопросом на совещании был вопрос о том, сколько предложений следует сохранить в обобщающих формах-списках. Руководитель команды предложил ограничиться 8 – 12 позициями в каждой форме-списке, отклонив предложения, которые высказывались менее чем тремя или двумя членами команды. В итоге сформировались четыре формы-списка, принятые за основу при проведении дальнейшей работы.

Сильные стороны внутренней деятельности:

- высокая квалификация профессорско-преподавательского состава (ППС);
- имеющийся опыт проведения профориентационной работы (дней открытых дверей, выезды ППС в школы, использование IT-технологии, проведение олимпиад школьников);
- наличие непрерывной подготовки (интернат для одаренных детей, подготовительное отделение, начальное профессиональное образование (НПО), наличие среднего специального образования (ССО), дневное и заочное отделения, институт дистанционного образования, магистратура, аспирантура, докторантура);
- широкий спектр специальностей (49), форм обучения и их возможных вариаций (одновременное обучение по 2-3 специальностям, двуязычная подготовка, дополнительные дисциплины в учебном плане (по заказу предприятий), бесплатное получение рабочей профессии при внебюджетной форме обучения);
- наличие инновационных способностей и возможностей их реализации;
- проверенный временем менеджмент, наличие СМК;
- наличие отдела по связям с общественностью, телестудии и своей газеты, издательского центра и типографии;
- наличие связей факультетов, кафедр, ППС с предприятиями и организациями;
- наличие условий обучения (учебные лаборатории, компьютерные классы и сети, общежития, учебные пособия и методические указания);
- высокий процент трудоустройства выпускников;
- достаточно большое число бюджетных мест при наборе на 1-й курс.

Слабые стороны внутренней деятельности:

- недостаток личной ответственности и заинтересованности сотрудников, что приводило к неэффективной профориентационной работе со школьниками, родителями и классными руководителями, выпускниками технического университета, и слабый профессионализм агитаторов;

– отсутствие PR-компаний о многообразных формах и уровнях подготовки в университете (среднее, НПО, ССО, ВПО, бакалавриат, магистратура, аспирантура), слабая реклама «райской» жизни, успешного трудоустройства и больших возможностей выпускников технического университета;

– отсутствие специального подразделения по скоординированным действиям при осуществлении профориентационной работы, а также службы анализа желаний абитуриентов и их родителей, не привлечение специалистов (психологов, социологов, пиарщиков и т.п.) к профориентационной работе;

– невозможность в должной мере финансировать стратегические и оперативные потребности (оплату командировок, выделение автотранспорта);

– высокая загруженность работников приемной комиссии, приводящая к закрытому характеру работы, невозможности получения оперативной информации, очередям;

– отсутствие обратной связи со стороны руководства за результаты профориентационной работы, показателей профориентационной работы в рейтинге преподавателя;

– не заинтересованная работа преподавателей с предприятиями, на которых трудятся выпускники и родители абитуриентов;

– отсутствие конструктивного сотрудничества с Управлением образования и науки области.

Возможности, предоставляемые внешней средой:

– хорошая репутация университета – лидера высшего технического образования в данном регионе;

– работа огромного числа выпускников университета на должностях руководителей и специалистов на большинстве предприятий области;

– возможности вертикальной интеграции с партнерами в области непрерывного профессионального образования (школа, НПО, ССО, бакалавриат, специалитет, магистратура, аспирантура, докторантура);

– выход на новые рынки или сегменты рынка (другие регионы, ближнее и дальнее зарубежье);

– IT-технологии в обучении, использование ресурсов ЦНИТ для привлечения абитуриентов;

– использование возможностей профориентационной работы через родственников и знакомых, студентов (вчерашних выпускников школ), хорошо знающих потенциальных абитуриентов;

– пресса, телевидение, газеты (формируют положительный имидж университета);

– в городе благоприятная обстановка для проживания и учебы студентов из стран ближнего и дальнего зарубежья;

– хорошее отношение к техническому университету со стороны руководства большинства образовательных учреждений и производственных предприятий;

– отсутствие у конкурентов возможности вести образовательную деятельность по техническим специальностям;

– потребность в подготовке, переподготовке и повышении квалификации персонала предприятий и организаций.

Угрозы, создаваемые внешней средой:

– демографическая «яма»;

– конкурентная борьба в ходе профориентационной работы, конкуренция коммерческих вузов;

– боязнь школьников выбирать технические ЕГЭ для поступления на технические специальности (зависимость рейтинга школ от результатов ЕГЭ; недостаточная подготовка в школах к ЕГЭ по предметам – физика, химия, информатика – с антирекламой администрациями школ данной подготовки в вузах);

- сокращение плановых цифр приема на бюджетные места;
- недовольные родители, выпускники, руководители;
- динамичные изменения рынка востребованности молодых специалистов, так как многие «старые» специальности становятся не престижными;
- неясность у работодателей возможностей трудоустройства бакалавров и магистров.

В целях обеспечения успешного проведения дальнейшей работы, ректор поручил группе специалистов по использованию инструментов и методов менеджмента качества подготовить и разослать всем членам команды следующие материалы:

- форму таблицы SWOT-анализа, которую каждый член команды должен использовать при поиске пути улучшения существующего положения дел и формулировании предложений о применении имеющихся сильных сторон (внутренней деятельности) и возможностей (предоставляемых окружающей средой) для преодоления существующих внутренних слабостей и нейтрализации угроз, исходящих со стороны внешней среды;

- форму таблицы представления планов мероприятий, используемую для оформления предложений членов команды, которые они считали необходимым включить как в стратегический план улучшения профориентационной работы образовательной организации (в целом), так и среднесрочные планы профориентационной работы на факультетах и кафедрах;

- сведения о сроках выполнения работы каждым членом команды и необходимости представить в ОУК: таблицу SWOT-анализа; предложения по включению мероприятий как в стратегический план университета, так и среднесрочные планы факультетов и кафедр.

Представленные членами команды в ОУК таблицы SWOT-анализа и сформированный сотрудниками ОУК обобщенный проект стратегического плана мероприятий были переданы ректору университета.

После завершения обсуждений с членами команды по предложенному проекту стратегического плана мероприятий, ректор (совместно с группой специалистов по использованию инструментов и методов менеджмента качества) провел работу по оценке показателей ВР и ЗП.

В процессе данной работы установлено, что ВР находится на уровне 90 – 100 %, а ЗП – очень высокая (результаты работы проявятся менее чем через год после внесения изменений в деятельность университета). Полученный результат (согласно данным табл. 1) свидетельствует об очень высоком ранге анализируемого варианта улучшения деятельности университета.

В итоге выполненной работы, ректор сообщил членам команды, что он пришел к выводу о необходимости осуществить структурную перестройку (изменения в организационной структуре) образовательной организации, а свои предложения об изменениях в организационной структуре университета сообщит на расширенном заседании ректората или ученого совета университета.

Ректор университета подготовил презентацию, содержащую план работы и предложения по внесению изменений в оргструктуру университета на уровне проректорского корпуса, а также указал на необходимость изменения состава и наименований факультетов с целью сделать эти наименования более понятными абитуриентам и членам их семей.

На заседании ученого совета, состоявшемся в октябре 2009 г., ректор представил подготовленные им предложения об изменении организационной структуры технического университета. Каждый член ученого совета имел возможность высказаться по этим предложениям. В процессе обсуждения были внесены уточнения в представленный проект оргструктуры, а затем открытым голосованием члены ученого совета поддержали подготовленные ректором предложения.

Важнейшим изменением оргструктуры стал пересмотр функций проректора по учебной работе (имевшего очень высокий уровень загруженности). Было создано специальное подразделение по координации профориентационной работы вуза, которое анализировало желания работодателей, абитуриентов и их родителей. Назначенный руководитель нового подразделения был наделен правами проректора. На очередном заседании ученого совета принято решение о включении в смету расходов университета на 2010 г. суммы, запрошенной новым подразделением на профориентационную деятельность вуза.

На основании вышеизложенного видно, что применение SWOT-анализа (являющегося общепризнанным инструментом стратегического менеджмента) для решения, казалось бы, частной задачи, связанной с необходимостью улучшить профориентационную работу, привело к необходимости подготовки и принятию решений стратегического уровня, связанных с осуществлением изменений в распределении полномочий и ответственности среди членов высшего руководства (проректоров) университета.

С точки зрения действующего в техническом университете механизма управления стратегическими и среднесрочными затратами (УССЗ) в рамках СМК это означало:

- появление в 2010 г. новых центров финансовой ответственности (ЦФО);
- уточнение процедур взаимодействия финансово-экономического управления (ФЭУ) с руководителями новых ЦФО;
- включение в состав механизма УССЗ подпроцессов взаимодействия ФЭУ с новыми ЦФО.

Работа, осуществленная в 2010 – 2012 гг., позволила успешно выполнить планы наборов студентов как на бюджетной, так и внебюджетной основах. С применением рекомендаций [22] получены оценки показателей результативности и эффективности выполненной работы, подтвердившие полезность изложенных методических рекомендаций (с использованием методологии SWOT-анализа) для решения важных проблем, связанных с улучшением деятельности в СМК образовательной организации.

Заключение

Приведенные в четвертом разделе статьи результаты использования вышеизложенных подходов к выявлению возможностей улучшения и последующего результативного и эффективного осуществления проектов улучшения свидетельствуют о перспективности широкого применения в образовательных организациях представленных методических рекомендаций.

Список литературы

1. Качалов, В. А. «Риски» и «возможности» в стандарте ISO 9001:2015: порознь или вместе? / В. А. Качалов // Методы менеджмента качества. – 2016. – № 7. – С. 22 – 26.
2. Пономарев, С. В. Применение балльных квалиметрических шкал для оценки индикатора «возможности» улучшения в СМК / С. В. Пономарев, С. С. С. Аль-Бусаиди // Методы менеджмента качества. – 2016. – № 11. – С. 14 – 18.
3. Пономарев, С. В. Практические подходы к оценке рисков в СМК / С. В. Пономарев // Методы менеджмента качества. – 2016. – № 7. – С. 30 – 35.
4. Пономарев, С. В. Подходы к оценке рисков в менеджменте качества / С. В. Пономарев, И. Н. Исаева // Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2008. – Т. 1, № 4 (14). – С. 136 – 141.

5. Моделирование рискованных ситуаций в экономике и бизнесе : учеб. пособие / А. М. Дубров [и др.] ; под ред. Б. А. Лагоши. – М. : Финансы и статистика, 2003. – 224 с.
6. ГОСТ Р 51705.1–2001. Системы качества. Управление качеством пищевых продуктов на основе принципов ХАССП. – Введ. 2001–07–01. – М. : Изд-во стандартов, 2001. – 11 с.
7. Rampersad, H. K. Total Quality Management: An Executive Guide to Continuous Improvement / H. K. Rampersad. – Berlin : Heidelberg ; New York : Springer Verlag, 2001. – 190 p.
8. Применение FMEA-анализа для улучшения процесса градуировки электронных весов / Е. И. Солодков [и др.] // Методы менеджмента качества. – 2004. – № 8. – С. 47 – 49.
9. ГОСТ Р 51814.2–2001. Системы качества в автомобилестроении. Метод анализа видов и последствий потенциальных дефектов. – Введ. 2002–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 2001. – 18 с.
10. Управление качеством продукции. Инструменты и методы менеджмента качества : учеб. пособие / С. В. Пономарев [и др.]. – М. : Стандарты и качество, 2005. – 248 с.
11. Управление качеством процессов и продукции. В 3-х кн. Кн. 2: Инструменты и методы менеджмента качества процессов в производственной, коммерческой и образовательной сферах : учеб. пособие / С. В. Пономарев, Г. А. Соседов, Е. С. Мищенко [и др.] ; под ред. С. В. Пономарева. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 212 с.
12. Черненький, А. В. Применение риск-ориентированного подхода при построении системы менеджмента качества / А. В. Черненький // Междунар. науч.-исслед. журн. – 2016. – № 8-1 (50). – С. 92 – 96. doi: 10.18454/IRJ.2016.50.165
13. Связова, Т. Г. Управление рисками в системе менеджмента качества: экономическое содержание и классификация рисков / Т. Г. Связова // Вестн. Московского ун-та. Сер. 6: Экономика. – 2017. – № 6. – С. 143 – 167.
14. Гельманова, З. С. Идентификация и действия в отношении ключевых рисков в деятельности компании / З. С. Гельманова, К. Lisiecka // Междунар. журн. приклад. и фундам. исслед. – 2017. – № 1-1. – С. 114 – 118.
15. Документированная процедура «Управление рисками» ДП–6.1–16 [Электронный ресурс] // ФГБОУ ВО «Волгоградский гос. мед. ун-т», 2016. – 12 с. – Режим доступа : https://www.volgmed.ru/uploads/files/2016-11/63175-dp_upravlenie_riskami.pdf (дата обращения: 11.01.2019).
16. Документированная процедура «Управление рисками. Предупреждающие действия» СМК.СТО.ОП10-009-2017 [Электронный ресурс] // ФГБОУ ВО «Сибирский гос. ун-т водного транспорта», 2017. – 24 с. – Режим доступа : http://smk.ssuwt.ru/_media/security/stp/urpd.pdf (дата обращения: 11.01.2019).
17. Документированная процедура «Управление рисками и возможностями» ОД-078-СМК-ДП-003 [Электронный ресурс] // ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», 2018. – 22 с. – Режим доступа : https://mai.ru/unit/ouk/docs/ОД-078-СМК-ДП-003_Управление_рисками_и_возможностями_1.0.pdf (дата обращения: 11.01.2019)
18. Виханский, О. С. Менеджмент : учебник / О. С. Виханский, А. И. Наумов. – 3-е изд. – М. : Гардарики, 2003. – 528 с.
19. Эванс, Дж. Р. Управление качеством / Дж. Р. Эванс ; пер. с англ. Э. М. Короткова. – М. : Юнити-Дана, 2007. – 671 с.
20. Аль-Бусаиди, С. С. С. Применение показателей исполнения деятельности при планировании и принятии управленческого решения об улучшении входного контроля сырья / С. С. С. Аль-Бусаиди, Т. И. Шакирова, С. В. Пономарев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 258 – 270. doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.258-270

21. Мищенко, Е. С. Применение SWOT-анализа при решении задач улучшения профориентационной работы в улучшении высшего профессионального образования / Е. С. Мищенко, С. В. Пономарев // Менеджмент качества продукции и услуг : материалы III Междунар. научн.-техн. конф. (27–28 апреля 2010 г., г. Брянск). – Брянск : БГТУ, 2010. – Т. 2. – С. 184 – 187.

22. Пономарев, С. В. Формирование и оценка показателей результативности и эффективности процессов СМК / С. В. Пономарев, С. В. Миронов // Стандарты и качество. – 2007. – № 8. – С. 70 – 72.

Assessing the Indicator for Improvement Possibility of the Effectiveness and Efficiency of the Quality Management System in an Educational Organization

S. V. Ponomarev¹, S. V. Mishchenko¹,
E. S. Mishchenko², S. S. S. Al-Busaidi¹

*Department of Mechatronics and Technological Measurements (1);
Management (2), TSTU, Tambov, Russia; svponom@yahoo.com*

Keywords: probability of realization; significance of consequences; improvement indicator; Quality Management System.

Abstract: Methodological recommendations on the practical application of point qualimetric scales for evaluating the “Indicator for improvement possibility” are considered. This includes the quality targets, planning and implementation of improvement projects in the quality management system of an educational organization based on the use of two indicators: the likelihood of realizing a potential improvement; the significance of the positive effects of the proposed improvement.

References

1. Kachalov V.A. [“Risks” and “opportunities” in the ISO 9001: 2015 standard: different or together?], *Metody menedzhmenta kachestva* [Quality management methods], 2016, no. 7, pp. 22-26. (In Russ.)

2. Ponomarev S.V., Al-Busaidi S.S.S. [Use of point qualimetric scales for assessing the indicator “possibility” of improvement in the QMS], *Metody menedzhmenta kachestva* [Quality management methods], 2016, no. 11, pp. 14-18. (In Russ.)

3. Ponomarev S.V. [Practical approaches to risk assessment in the QMS], *Metody menedzhmenta kachestva* [Quality management methods], 2016, no. 7, pp. 30-35. (In Russ.)

4. Ponomarev S.V., Isayeva I.N. [Approaches to risk assessment in quality management], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2008, vol. 1, no. 4 (14), pp. 136-141. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Dubrov A.M., Lagosha B.A. [Ed.], Khrustalev E.Yu. *Modelirovaniye riskovykh situatsiy v ekonomike i biznese* [Modeling risk situations in the economy and business], Moscow: Finansy i statistika, 2003, 224 p. (In Russ.)

6. GOST R 51705.1–2001. Sistemy kachestva. Upravleniye kachestvom pishchevykh produktov na osnove printsipov KHASSP [Quality systems. Food quality management based on the principles of HACCP], Moscow: Izdatel'stvo standartov, 2001, 11 p. (In Russ.)

7. Rampersad H.K. Total Quality Management: An Executive Guide to Continuous Improvement, *Berlin :Heidelberg ; New York :Springer Verlag*, 2001, 190 p.
8. Solodkov Ye.I., Ponomarev S.V., Zhmayev A.N., Mironov S.V., Bushkov A.A. [Application of FMEA-analysis to improve the calibration process of electronic scales], *Metody menedzhmenta kachestva* [Quality management methods], 2004, no. 8, pp.47-49. (In Russ.)
9. GOST R 51814.2–2001. *Sistemy kachestva v avtomobilestroyenii. Metod analiza vidov i posledstviy potentsial'nykh defektov* [Quality systems in the automotive industry. A method for analyzing the types and effects of potential defects], Moscow: Izdatel'stvo standartov, 2001, 18 p. (In Russ.)
10. Ponomarev S.V., Mishchenko S.V., Belobragin V.Ya., Samorodov B.A., Gerasimov B.I., Trofimov A.V., Pakhomova C.A., Ponomareva O. S. *Upravleniye kachestvom produktsii. Instrumenty i metody menedzhmenta kachestva* [Product quality management. Tools and methods of quality management], Moscow: Standarty i kachestvo, 2005, 248 p. (In Russ.)
11. Ponomarev S.V. [Ed.], Sosodov G.A., Mishchenko Ye.S. [et al.] *Upravleniye kachestvom protsessov i produktsii. V 3-kh kn. Kn. 2: Instrumenty i metody menedzhmenta kachestva protsessov v proizvodstvennoy, kommercheskoy i obrazovatel'noy sferakh* [Quality management of processes and products. In 3 books. Prince 2: Tools and methods of quality management of processes in the industrial, commercial and educational spheres], Tambov: Izdatel'stvo FGBOU VPO «TGTU», 2012, 212 p. (In Russ.)
12. Chernen'kiy A.V. [Application of a risk-based approach in the construction of a quality management system], *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Scientific Research Journal], 2016, no. 8-1 (50), pp. 92-96, doi: 10.18454/IRJ.2016.50.165 (In Russ., abstract in Eng.)
13. Sviyazova T.G. [Risk management in the quality management system: economic content and risk classification], *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 6: Ekonomika* [Moscow University Bulletin. Series 6: Economy], 2017, no. 6, pp. 143-167. (In Russ., abstract in Eng.)
14. Gel'manova Z.S., Lisiecka K. [Identification and actions in relation to key risks in the company's activities], *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research], 2017, no. 1-1, pp. 114-118. (In Russ., abstract in Eng.)
15. https://www.volgmed.ru/uploads/files/2016-11/63175-dp_upravlenie_riskami.pdf (accessed 11 January 2019).
16. http://smk.ssuwt.ru/_media/security/stp/urpd.pdf (accessed 11 January 2019).
17. https://mai.ru/unit/ouk/docs/ОД-078-СМК-ДП-003_Управление_рисками_и_возможностями_1.0.pdf (accessed 11 January 2019).
18. Vikhanskiy O.S., Naumov A.I. *Menedzhment: uchebnik* [Management: textbook], Moscow: Gardariki, 2003, 528 p. (In Russ.)
19. Evans Dzh.R. *Upravleniye kachestvom* [Quality Management], Moscow: Yuniti-Dana, 2007, 671 p. (In Russ.)
20. Al'-Busaidi S.S.S., Shakirova T.I., Ponomarev S.V. [Use of performance indicators in planning and making management decisions on improving input control of raw materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 258-270, doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.258-270 (In Russ., abstract in Eng.)
21. Mishchenko Ye.S., Ponomarev S.V. *Menedzhment kachestva produktsii i uslug: materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Quality management of products and services: proceedings of the III International Scientific and Technical Conference], 27-28 April, 2010, Bryansk, Bryansk: BGTU, 2010, vol. 2, pp. 184-187. (In Russ.)
22. Ponomarev S.V., Mironov S.V. [Formation and evaluation of indicators of the effectiveness and efficiency of QMS processes], *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality], 2007, no. 8, pp. 70-72. (In Russ.)

Бewertung des Indikators für Verbesserungsmöglichkeiten und Ausführung der Aktivitäten zur Verbesserung der Leistung und Wirksamkeit der Prozesse des Qualitätsmanagementsystems in der Bildungsorganisation

Zusammenfassung: Betrachtet sind die methodischen Empfehlungen für die praktische Anwendung der punktuellen qualimetrischen Skalen zur Bewertung des Indikators “Verbesserungsindikator” mit folgender Bestimmung der Ziele auf dem Gebiet der Qualität, der Planung und Implementierung von Verbesserungsprojekten im Qualitätsmanagementsystem einer Bildungseinrichtung basierend auf der Verwendung von zwei Indikatoren: der Wahrscheinlichkeit einer möglichen Verbesserung; der Bedeutung der positiven Auswirkungen der angenommenen Verbesserung.

Évaluation de l'indicateur de la possibilité d'améliorer et d'exécuter les activités visant à élever l'efficacité et la productivité des processus du système du management de la qualité de l'organisation éducative

Résumé: Sont examinées les recommandations méthodologiques sur l'application pratique des échelles de notation pour évaluer l'indice “Indicateur de l'amélioration possible”, avec la définition ultérieure des objectifs de la qualité, de la planification et de l'exécution des projets d'amélioration dans le système de management de la qualité de l'organisation éducative, basés sur l'utilisation de deux indicateurs: la probabilité de la réalisation d'une amélioration potentielle; l'importance des effets positifs de l'amélioration prévue.

Авторы: *Пономарев Сергей Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Мехатроника и технологические измерения»; *Мищенко Сергей Владимирович* – доктор технических наук, профессор, научный руководитель кафедры «Мехатроника и технологические измерения»; *Мищенко Елена Сергеевна* – доктор экономических наук, профессор кафедры «Менеджмент», проректор по международной деятельности; *Аль-Бусаиди Саид Султан Саид* – аспирант кафедры «Мехатроника и технологические измерения», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Спирidonov Сергей Павлович* – доктор экономических наук, профессор, директор Института экономики и качества жизни, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭКСТРАГИРОВАНИЯ
В РОТОРНОМ ИМПУЛЬСНОМ АППАРАТЕ
С ПРОФИЛИРОВАННЫМ РОТОРОМ**

М. А. Промтов, А. Ю. Степанов

*Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; promtov@tambov.ru*

Ключевые слова: гуминовая кислота; кавитация; роторный импульсный аппарат; торф; фульвовая кислота; экстрагирование.

Аннотация: Выполнен анализ направлений повышения эффективности работы роторного импульсного аппарата (РИА). Геометрическая форма внутренней полости ротора в виде профиля трубки Вентури по радиальному направлению способствует увеличению интенсивности механической, гидродинамической и кавитационной обработки суспензии. Интенсивность кавитации для РИА с профилированной полостью ротора выше по сравнению с конструкциями с цилиндрической полостью ротора. Применение РИА с активной зоной гидромеханической обработки суспензии в полости ротора интенсифицирует процесс экстрагирования гуминовой и фульвовой кислот из торфа в водный раствор.

Обозначения

C – концентрация, кг/м ³ ;	V – скорость потока, м/с;
P_c, P_p, P_n – давления соответственно в канале статора, полости ротора и насыщенного пара жидкости, Па;	t – температура, °С;
	ρ – плотность жидкости, кг/м ³ ;
	χ – число гидродинамической кавитации.

Введение

Роторный импульсный аппарат (РИА) предназначен для структурных преобразований в жидкости на микро- и наноуровнях в целях изменения ее физико-химических параметров, интенсификации массообменных и гидромеханических процессов. Обработка жидкости в РИА осуществляется за счет импульсного многофакторного воздействия: пульсаций давления, интенсивной кавитации, вихреобразования, ударных волн и нелинейных гидроакустических эффектов [1].

Для повышения эффективности процесса экстрагирования целевых веществ из твердых частиц в жидкость необходимо предварительное измельчение частиц сырья. Интенсификация процесса экстрагирования в РИА является одним из перспективных направлений, так как в РИА реализуются ударно-сдвиговые, срезающие и кавитационные виды воздействия на частицы обрабатываемой суспензии, сопровождаемые измельчением и изменением структуры обрабатываемого материала, что значительно облегчает выход целевых веществ из частиц сырья.

В роторном импульсном аппарате можно выделить пять основных зон с активными гидродинамическими потоками: полость ротора, канал ротора, зазор между ротором и статором, канал статора, рабочая камера. Наиболее активными зонами РИА являются каналы ротора и статора, зазор между ротором и статором. В обрабатываемой суспензии в указанных активных зонах возникают большие пульсирующие сдвиговые и срезающие нагрузки, которые деформируют и измельчают частицы, клетки и капилляры в обрабатываемом сырье. В промежутки времени, когда каналы ротора перекрыты стенкой статора, в полости ротора возрастает давление, которое за короткий период времени сбрасывается. В момент совмещения каналов ротора с каналами статора, в них распространяется импульс давления [1, 2].

Твердые частицы до момента совмещения каналов ротора и статора находятся в канале ротора и прижимаются к его стенке за счет силы инерции, а также продавливаются в зазор между ротором и статором за счет перепада давления между полостью ротора и каналом статора. При вращении ротора и подаче жидкости в полость ротора под давлением, частицы двигаются вместе с потоком жидкости и проходят из канала ротора или зазора в канал статора.

Теоретическая часть

Повышение эффективности работы РИА можно достичь особой геометрией полости ротора аппарата и установкой дополнительных турбулизирующих элементов. Необходимо увеличить гидродинамическое и гидроакустическое воздействия РИА в полости ротора, так как она имеет большой объем и через эту зону проходит вся обрабатываемая жидкость. Движение жидкости в полости ротора носит сложный характер по спирали, так как ротор вращается с большой скоростью. Кроме того, поток жидкости пульсирует из-за периодического совмещения каналов ротора с каналами статора.

По сравнению с каналами ротора и статора, скорость потока жидкости в полости ротора невелика, так как для РИА радиального типа поток расходится по радиусу от центра ротора, и площадь проходного сечения значительно увеличивается по мере удаления от центра ротора по радиальной прямой. В связи с этим, скорость потока за счет перепада давления в радиальном направлении снижается. В противовес падению скорости потока в роторе, из-за увеличения площади проходного сечения, действует центробежная сила, которая существенно разгоняет центробежный поток в радиальном направлении.

Нами предложены конструктивные решения РИА, повышающие эффективность его работы за счет изменения конфигурации полости ротора [3, 4]. Предварительная обработка жидкости в полости ротора осуществляется за счет ее прохождения через профильный объем в его внутренней полости. Сечение внутренней полости ротора по радиальной прямой имеет профиль одного или нескольких последовательных сужений и расширений или форму профиля трубки Вентури [3, 4]. Профиль трубки Вентури широко применяется в технике и технологиях для создания кавитации в проходящем потоке жидкости. Эффективность развития кавитации при прохождении жидкости с закономерностями изменения давления и скорости потока, как это происходит при движении жидкости в трубке Вентури, значительно выше по сравнению с потоком, проходящим через профиль постоянного сечения.

В программе ANSYS проведен расчет скорости и давления жидкости в области пространства, ограниченной трехмерной моделью внутреннего объема РИА. Расчет параметров потока жидкости в РИА осуществлялся для следующих условий: $t = 25^{\circ}\text{C}$ – начальная температура обрабатываемой суспензии; $P_p = 4 \cdot 10^5$ Па – давление на входе в РИА; $P_c = 4 \cdot 10^4$ Па – давление на выходе из канала статора.

На рисунке 1 представлены результаты расчета скоростей потока жидкости в РИА. Скорость потока жидкости и давление в основных рабочих зонах РИА определялись по трем сечениям для РИА различных конструкций: в центральной части полости ротора (сечение I), каналах ротора (сечение II) и статора (сечение III), как показано на рис. 1. Такое зональное деление внутренней полости РИА позволяет определить точные расчетные значения скорости потока жидкости и давление по сечениям, выявить застойные зоны аппарата.

Одной из характеристик, показывающих эффективность кавитационного воздействия РИА, является число гидродинамической кавитации χ – степень развитости кавитационных явлений. При $0 < \chi < 1$ кавитация считается развитой, причем, чем меньше значение χ , тем интенсивнее кавитация.

Число гидродинамической кавитации можно определить на основании данных по давлению в потоке жидкости и скорости жидкости, полученных с использованием расчета гидродинамики в программе ANSYS по формуле [2]

$$\chi = \frac{2(P_c - P_n)}{\rho V^2}.$$

Расчет числа гидродинамической кавитации проведен для различных конструкций РИА: с цилиндрической формой внутренней полости ротора и РИА с профилем внутренней поверхности ротора, выполненного в форме профиля трубки Вентури.

Анализ результатов расчета числа кавитации χ позволяет сделать вывод о целесообразности применения конструкции РИА с профилем внутренней поверхности ротора, выполненного по форме сечения трубки Вентури. По расчетным данным (см. рис. 1), интенсивность кавитации для РИА с профилированной полостью ротора значительно выше по сравнению с РИА с цилиндрической полостью ротора. Расчетные данные свидетельствуют об увеличении интенсивности кавитации, так как значения числа гидродинамической кавитации χ близки к единице в зоне I, в зонах II и III для аппаратов новой конструкции, – меньше единицы, что характерно для потока с развитой кавитацией.

Результаты компьютерного моделирования потока жидкости в РИА позволяют подобрать рациональные геометрические и режимные параметры аппарата, обеспечивающие эффективную обработку суспензии.

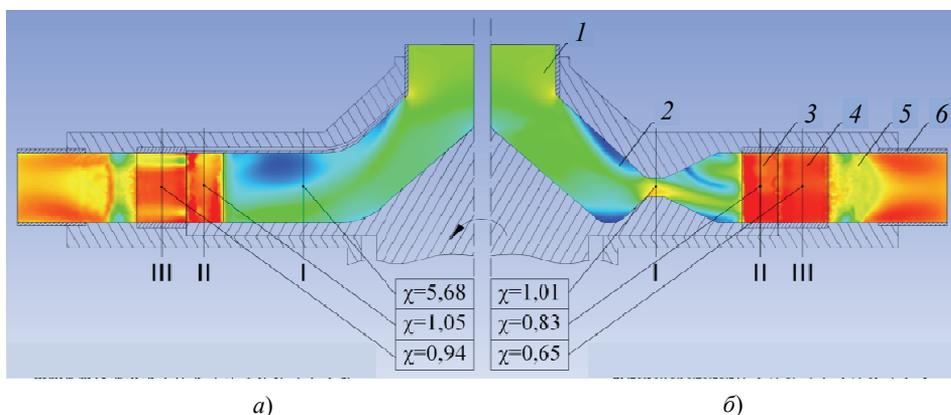


Рис. 1. Результаты расчета скорости потока жидкости в РИА по сечениям:

a – цилиндрическая полость ротора; *б* – сечение полости ротора

по радиальной прямой – профиль трубки Вентури;

1, 6 – входной и выходной патрубков соответственно; 2 – внутренняя полость ротора; 3, 4 – каналы ротора и статора соответственно; 5 – рабочая камера; I, II, III – сечения в центральной части полости ротора, каналах ротора и статора соответственно

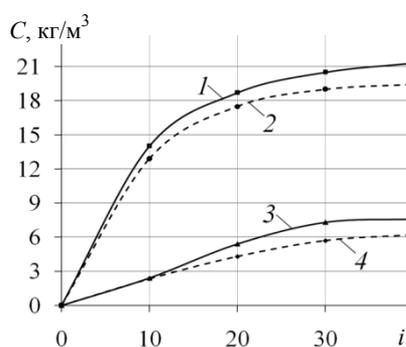


Рис. 2. Графики изменения концентрации ГК и ФК в суспензии торфа от числа циклов обработки i в РИА с цилиндрической полостью ротора (кривые 2, 4) и РИА с профилированной полостью ротора (кривые 1, 3): 1, 2 – экстрагирование ГК; 3, 4 – экстрагирование ФК

Экспериментальная часть

Для подтверждения эффективности применения предлагаемых конструкций РИА, выполненных с цилиндрической полостью ротора и профилированной полостью ротора, обоснования влияния гидродинамической кавитации на эффективность процесса экстрагирования, экспериментально исследовали процесс извлечения гуминовых (ГК) и фульвовых (ФК) кислот из торфа. Использование кавитации и импульсного гидромеханического воздействия на обрабатываемые суспензии обеспечивает высокую степень измельчения частиц, а также увеличивает выход водорастворимых ГК в раствор без применения химических реагентов.

Просеянное сырье смешивали с водой в соотношении 1 : 4 и затем заливали в емкость экспериментального стенда. После предварительного перемешивания и равномерного распределения суспензии в гидравлической системе проводили ее многократную обработку, прокачивая насосом через РИА. По достижению 10, 20, 30 и 40 циклов обработки суспензии через РИА осуществляли отбор проб.

Результаты экспериментального исследования по определению выхода ГК и ФК в воду при экстрагировании из суспензии торфа в РИА новой конструкции представлены на рис. 2.

Обсуждение результатов и выводы

Модификация внутренней полости ротора в виде профиля трубки Вентури способствует предварительной механической и гидродинамической обработке суспензии. Интенсивность кавитации для РИА с профилированной полостью ротора значительно выше по сравнению с РИА с цилиндрической полостью ротора. Применение РИА с активной зоной гидромеханической обработки суспензии в полости ротора интенсифицирует процесс экстрагирования ГК и ФК из торфа в водный раствор. Выход гуминовых кислот из частиц торфа увеличился на 10, фульвовых – на 17 %.

Список литературы

1. Промтов, М. А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов / М. А. Промтов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 861 – 869.

2. Промтов, М. А. Компьютерная система расчета роторного импульсного аппарата / М. А. Промтов, А. Ю. Степанов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 83 – 89.

3. Полезная модель к патенту 147138 Рос. Федерация, МПК В01F 7/28. Роторный импульсный аппарат / М. А. Промтов, А. Ю. Степанов, А. В. Алешин ; патентообладатель М. А. Промтов. – № 2014117787/05 ; заявл. 30.04.2014 ; опубл. 27.10.2014, Бюл. № 30. – 7 с.

4. Полезная модель к патенту 159457 Рос. Федерация, МПК В01F 7/10. Роторный импульсный аппарат / М. А. Промтов, А. В. Алешин, М. М. Колесникова ; патентообладатель М. А. Промтов. – № 2015108445/05 ; заявл. 11.03.2015 ; опубл. 10.02.2016, Бюл. № 4. – 4 с.

Intensification of the Extraction Process in the Rotary Pulse Device with a Profiled Rotor

M. A. Promptov, A. Yu. Stepanov

*Department of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety,
TSTU, Tambov, Russia; promptov@tambov.ru*

Keywords: humic acid; cavitation; rotary pulse device; peat; fulvic acid; extraction.

Abstract: The analysis of the directions of increasing the efficiency of the rotary pulse apparatus (RPA) was performed. The geometric shape of the internal cavity of the rotor in the form of a Venturi tube profile in the radial direction increases the intensity of the mechanical, hydrodynamic and cavitation slurry treatment. The cavitation intensity for RPA with a profiled rotor cavity is higher compared with the designs with a cylindrical rotor cavity. The use of RPA with the active zone of hydromechanical treatment of the suspension in the rotor cavity intensifies the process of extracting humic acid and fulvic acid from peat into an aqueous solution.

References

1. Promptov M.A. [Prospects for the use of cavitation technologies for the intensification of chemical-technological processes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 4, pp. 861-869. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Promptov M.A., Stepanov A.Yu. [Computer system for calculating rotary impulse apparatus], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 1, pp. 83-89. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Promptov M.A., Stepanov A.Yu., Aleshin A.V. *Rotornyy impul'snyy apparat* [Rotary pulse device], Russian Federation, 2014, Poleznaya model' k pat. 147138. (In Russ.)

4. Promptov M.A., Aleshin A.V., Kolesnikova M.M. *Rotornyy impul'snyy apparat* [Rotary pulse device], Russian Federation, 2016, Poleznaya model' k pat. 159457. (In Russ.)

Intensivierung des Extraktionsprozesses im Dreh -Impuls-Gerät mit profiliertem Rotor

Zusammenfassung: Es ist die Analyse der Richtungen zur Steigerung der Effizienz der Drehimpulsvorrichtung (RIA) durchgeführt. Die geometrische Form des inneren Hohlraums des Rotors in Form eines Venturi-Rohrprofils in radialer Richtung

erhöht die Intensität der mechanischen, hydrodynamischen und Kavitationsbehandlung von Suspensionen. Die Kavitationsintensität für RIA mit profiliertem Rotorhohlraum ist höher als bei Konstruktionen mit zylindrischem Rotorhohlraum. Die Verwendung von RIA mit der aktiven Zone der hydromechanischen Behandlung der Suspension im Rotorhohlraum verstärkt den Extraktionsprozess von GC und FC aus Torf in eine wässrige Lösung.

Intensification du processus d'extraction dans un appareil rotor d'impulsion avec un rotor profilé

Résumé: Est effectuée une analyse des directions de l'augmentation de l'efficacité du fonctionnement de l'appareil rotor d'impulsion (ARI). La forme géométrique de la cavité interne du rotor sous la forme d'un profil de tube Venturi dans la direction radiale contribue à augmenter l'intensité de la mécanique du traitement hydro-dynamique et celui de cavitation de la suspension. L'intensité de la cavitation pour ARI avec la cavité profilée du rotor est plus élevée par rapport aux structures avec la cavité cylindrique du rotor. L'application de ARI avec le secteur actif du traitement hydro-mécanique de la suspension dans la cavité du rotor intensifie le process d'extraction du GC et du FC à partir de la tourbe dans la solution aqueuse.

Авторы: *Промтов Максим Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», декан факультета международного образования; *Степанов Андрей Юрьевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Туголуков Евгений Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

О ВЛИЯНИИ КОМПЛЕКСНОГО ПАРАМЕТРА ГРАВИТАЦИОННОГО АППАРАТА НА КАЧЕСТВО СМЕСИ ПОСЛЕ ПЕРВОЙ СТАДИИ СМЕШИВАНИЯ

А. Б. Капранова, И. И. Верлока, П. А. Яковлев, Д. Д. Бахаева

*Кафедра теоретической механики и сопротивления материалов,
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,
г. Ярославль, Россия; kapranova_anna@mail.ru*

Ключевые слова: гравитационный смеситель; коэффициент неоднородности; отбойник; порционное смешивание; сыпучие материалы; функции распределения; щеточные элементы.

Аннотация: Предложен способ оценки качества смеси на первой стадии смешивания сыпучих компонентов в смесителе гравитационного типа на основе стохастической модели процесса образования разреженных потоков. Анализ полученных зависимостей для коэффициента неоднородности сыпучей смеси показал существенное влияние на процесс смешивания комплексного конструктивно-режимного параметра, характеризующего степень деформации щеточных элементов.

Порционное смешивание сыпучих компонентов применяется на многих производственных предприятиях различных направлений, в том числе пищевой и фармацевтической промышленности, для строительства дорожных покрытий, при изготовлении стекольной продукции и т.п.

При этом актуальность разработки соответствующего специального оборудования со временем не снижается в связи с необходимостью учета, с одной стороны, множества факторов, влияющих на качество смешивания, с другой, – особенностей технологического регламента, предъявляемого к готовой продукции. К последним требованиям относится достижение заданного соотношения между сыпучими компонентами, например, когда объемно-весовое содержание соответствует пропорции 1 : 10 и более. Для решения таких технологических задач могут быть использованы аппараты со смесительными элементами в виде жестких лопастей и упругих бил. Первые обычно реализуются в устройствах центробежного типа, вторые – в ленточных [1, 2] и гравитационных [1, 3 – 5] аппаратах.

В настоящей работе исследуется качество сыпучей смеси, получаемой в гравитационном аппарате при трехстадийном смешивании из двух компонентов, частицы которых при моделировании [3] условно принимаются за сферические и имеют сравнимые размеры.

Ряд новых гравитационных смесителей [4, 5] имеют над лотками в качестве дополнительных элементов барабанные устройства со щетками и отражательные (отбойные) наклонные поверхности для каждой из трех стадий работы аппаратов. Остановимся на первой стадии получения первичной сыпучей смеси при соотношении компонентов 1 : 10 и более.

При этом используем выражение для расчета объемно-весовых долей сыпучих компонентов на каждой из τ -стадии [4]. Для первой стадии ($\tau = 1$, верхний индекс) приращение второго компонента определяется величиной

$$\Delta\delta_2^1 = \delta_2^1 - \delta_1^1, \quad (1)$$

где δ_i^1 – объемные доли материалов «1» и «2» при $i=1,2$, задающие регламент для их объемов $V_1^1 : V_2^1 = \delta_1^1 : \delta_2^1$. Пусть материал «2» имеет $\delta_2^1 \gg \delta_1^1$.

Выполненное в работах [3 – 5] стохастическое моделирование позволило получить набор неравновесных функций распределения $W_{ij}(\varepsilon_{2i})$ для числа частиц компонента $i = 1, 2$ по углу отражения от наклонной отбойной поверхности ε_{2i} при учете срыва со щеточных деформированных элементов $j = \overline{1, n_b}$, спирально навитых на цилиндрическую поверхность смесительного барабана.

Вводя полные неравновесные функции распределения для числа частиц каждого компонента $R_1(\varepsilon_{21})$ и $R_2(\varepsilon_{22})$ соответственно в зависимости от углов отражения ε_{21} и ε_{22} :

$$R_1(\varepsilon_{21}) = \prod_{j=1}^{n_b} W_{1j}(\varepsilon_{21}); \quad (2)$$

$$R_2(\varepsilon_{22}) = \prod_{j=1}^{n_b} W_{2j}(\varepsilon_{22}), \quad (3)$$

можно оценить качество смеси по следующему критерию в виде коэффициента ее неоднородности

$$V_c^1 = 100 \left(\frac{\langle (c_1^1)^2 \rangle}{\langle c_1^1 \rangle^2} - 1 \right)^{1/2}, \quad (4)$$

где значения среднего $\langle c_1^1 \rangle$ от доли ключевого компонента «1» смеси (нижний индекс) c_1^1 и среднего от ее квадрата $\langle (c_1^1)^2 \rangle$ вычисляются согласно выражениям:

$$\langle c_1^1 \rangle = \frac{1}{(\varepsilon_{21\max} + \varepsilon_{21\min})} \frac{1}{(\varepsilon_{22\max} + \varepsilon_{22\min})} \int_{\varepsilon_{22\min}}^{\varepsilon_{22\max}} d\varepsilon_{22} \int_{\varepsilon_{21\min}}^{\varepsilon_{21\max}} c_1^1(\varepsilon_{21}, \varepsilon_{22}) d\varepsilon_{21}; \quad (5)$$

$$\langle (c_1^1)^2 \rangle = \frac{1}{(\varepsilon_{21\max} + \varepsilon_{21\min})} \frac{1}{(\varepsilon_{22\max} + \varepsilon_{22\min})} \int_{\varepsilon_{22\min}}^{\varepsilon_{22\max}} d\varepsilon_{22} \int_{\varepsilon_{21\min}}^{\varepsilon_{21\max}} [c_1^1(\varepsilon_{21}, \varepsilon_{22})]^2 d\varepsilon. \quad (6)$$

Распределения (2) и (3) используются при расчете доли ключевого компонента «1» смеси (нижний индекс) c_1^1 , полученной на первом этапе работы гравитационного устройства, в зависимости от физико-механических характеристик сыпучих материалов и конструктивно-режимных параметров смесителя

$$c_1^1(\varepsilon_{21}, \varepsilon_{22}) = \rho_{T1} R_1(\varepsilon_{21}) \left\{ \sum_{i=1}^{n_k} \rho_{Ti} R_1(\varepsilon_{2i}) + \rho_{T2} \Delta\delta_2^1 \prod_{j=1}^{n_b} R_2(\varepsilon_{22}) \right\}^{-1}, \quad (7)$$

где значение $\Delta\delta_2^1$ при условии

$$\frac{V_1^1}{V_2^1} = \frac{1}{n_V}, \quad (8)$$

согласно определению (1), вычисляется по формуле

$$\delta_2^1 = \left| \left[2^{-1}(n_V - 1) + 1 \right] (\tau - 1) - 1 \right| \delta_1^1, \quad \tau = \overline{2, n_\tau}. \quad (9)$$

Анализ качества получаемой сыпучей смеси выполняется при разделении множества параметров процесса смешивания на три группы: конструктивные

$(r_b, L_b, h_s, l_b, \mu_0, L_i, h_i)$; режимные $(h_L, h_0, \omega, \psi_1)$ и физико-механические для смешиваемых материалов (ρ_{Ti}, d_{Ti}) и щеточных элементов (k_u) .

Здесь обозначено: r_b, L_b – радиус и длина барабана; h_s – шаг винтовой навивки щеточных элементов; l_b – их длина; μ_0 – угол между вертикалью и лотком; L_i – ширина разброса частиц сорта i на лотке; h_i – кратчайшее расстояние между лотком и отбойником к точке удара усредненного потока частиц сорта i ; h_L – толщина слоев компонентов в барабанно-лотковом зазоре; h_0 – высота этого зазора; ω – угловая скорость вращения барабана; ψ_1 – угол между отбойником и горизонталью; ρ_{Ti} – истинная плотность вещества компонента сорта i ; d_{Ti} – усредненный диаметр частиц сорта i ; k_u – коэффициент угловой жесткости щеточного элемента.

В ходе опытных испытаний и теоретических расчетов получена целесообразность введения комплексного конструктивно-режимного параметра, отражающего степень деформирования щеточных элементов при их взаимодействии с лотком и слоями сыпучих компонентов после прохождения барабанно-лоткового зазора, аналогичного введенному в работе [6],

$$\Delta = l_b/h_0. \quad (10)$$

Особый интерес при выборе наиболее рациональных диапазонов изменения параметров процесса представляют следующие характеристики: угловая скорость вращения барабана ω ; угол между отбойником и горизонталью ψ_1 ; сформированный комплексный показатель Δ из формулы (10).

Расчет коэффициента неоднородности V_c^1 в соответствии с выражениями (4) – (7) в зависимости от двух указанных параметров ω и Δ позволяет спрогнозировать выбор рациональных пределов их изменения. На рисунке 1 приведены теоретические и экспериментальные зависимости $V_c^1(\Delta)$:

$$\begin{aligned} 1, I', I'' - \omega &= 45,7 \text{ с}^{-1}; 2, 2', 2'' - \omega = 47,0 \text{ с}^{-1}; 3, 3', 3'' - \omega = 48,0 \text{ с}^{-1}; \\ I'' - V_c(\Delta) &= 19 - 4\Delta + 7 \cdot 10^{-13} \Delta^2; 2'' - V_c(\Delta) = 309 - 393\Delta + 130\Delta^2; \\ 3'' - V_c(\Delta) &= 11 - 4,16\Delta + 3,8\Delta^2. \end{aligned}$$

Конструктивные параметры гравитационного аппарата:

$$r_b = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}; l_b = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}; h_s = (1,5 - 3,0) \cdot 10^{-2} \text{ м}; L_b = 1,85 \cdot 10^{-1} \text{ м}; n_b = 3;$$

$$\rho_{T1} = 1,440 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; d_{s1} = 4,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}; \mu_0 = 1,3089 \text{ рад}; \mu = 0,7071 \text{ рад};$$

$$L_2 = 2,8 \cdot 10^{-1} \text{ м}; h_2 = 8,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Физико-механические свойства смешиваемых материалов

$$\rho_{T2} = 1,525 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; d_{s2} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

Согласно рис. 1 (кривая 2), вследствие минимальности значений V_c^1 , предпочтительно длину щеточных элементов l_b и высоту барабанно-лоткового зазора h_0 выбирать так, чтобы их отношение было равно $\Delta = 1,49...1,52$ при значении $\omega = 47 \text{ с}^{-1}$. Второй минимум для коэффициента неоднородности наблюдается при значении $\omega = 45,7 \text{ с}^{-1}$ вблизи $\Delta = 1,6$ (см. рис. 1, кривая 1), однако влияние других режимных параметров из оставшихся в выделенной группе сказывается более явно. Выбор меньших значений комплексного конструктивно-режимного параметра (в частности, $\Delta < 1,45$ (см. рис. 1, кривая 3)) в сравнении со значением из диапазона $\Delta = 1,49...1,52$ приводит к увеличению угловой скорости до значения

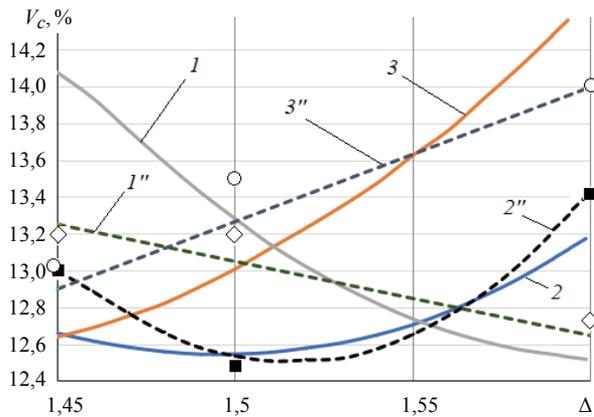


Рис. 1. Зависимость коэффициента неоднородности $V_c(\Delta)$ сыпучей смеси от комплексного конструктивно-режимного параметра Δ для первой стадии смешивания в гравитационном аппарате для манной крупы ГОСТ 7022–97 ($i = 1$) и природного песка ГОСТ 8736–93 ($i = 2$):

1, 2, 3 – теория; 1'', 2'', 3'' – регрессионные зависимости;
 ◊ – 1', ■ – 2', ○ – 3' – экспериментальные данные

$\omega = 48 \text{ с}^{-1}$, что впоследствии отразится на возрастании потребляемой мощности смесительных барабанов.

На рисунке 1 приведены экспериментальные данные (точки 1', 2', 3') и соответствующие им регрессионные зависимости (кривые 1'', 2'', 3''). Относительная погрешность при сопоставлении опытных и расчетных значений: 18 % при $\omega = 45,7 \text{ с}^{-1}$; 8 % при $\omega = 47 \text{ с}^{-1}$; 14 % при $\omega = 48 \text{ с}^{-1}$. Указанное расхождение связано с неучтенным в стохастической модели столкновением частиц в разреженных потоках после отражения от отбойника.

Последующие расчеты производительности гравитационного смесителя на основе предложенных стохастических моделей движения сыпучих компонентов после срыва со щеточных элементов (в момент образования разреженных потоков) [7] и после ударного взаимодействия с наклонной поверхностью [4, 5, 8] подтвердили значимость выделенных параметров ω и Δ [9].

Предложенный подход позволяет выполнить расчет коэффициента неоднородности получаемой смеси для других стадий изучаемого процесса смешивания сыпучих компонентов, необходимых при формировании методики инженерного расчета нового оборудования гравитационного типа.

Список литературы

1. Способы описания движения твердых дисперсных сред в различных плоскостях для сечений смесительного барабана / А. Б. Капанова [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 296 – 304. doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.296-304
2. Бакин, М. Н. Исследование распределения сыпучих компонентов в рабочем объеме барабанно-ленточного смесителя / М. Н. Бакин, А. Б. Капанова, И. И. Верлока // Фундам. исслед. – 2014. – № 5-5. – С. 928 – 933.
3. The Model of Dispersion of Particles During Their Flow from Chipping the Surface / А. В. Капанова [et al.] // Czasopismo Techniczne. Mechanika. – 2016. – Vol. 113, No. 2. – P. 145 – 150.
4. Капанова, А. Б. Об оценке содержания ключевого компонента после ударного рассеивания сыпучих материалов на начальном этапе порционного смешивания / А. Б. Капанова, И. И. Верлока // Вестн. Ивановского гос. энергет. ун-та. – 2016. – № 3. – С. 78 – 83. doi: 10.17588/2072-2672.2016.3.078-083

5. Stochastic Modeling of Bulk Components Batch Mixing Process in Gravity Apparatus [Электронный ресурс] / I. I. Verloka, A. B. Kapranova, M. Tarshis, S. Cherpitsky // International Journal of Mechanical Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 9, Issue 2. – P. 438 – 444. – Режим доступа : http://www.iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJMET/VOLUME_9_ISSUE_2/IJMET_09_02_045.pdf (дата обращения: 28.12.2018).

6. Капранова, А. Б. Моделирование критерия качества смеси в объеме барабанно-ленточного устройства / А. Б. Капранова, М. Н. Бакин, И. И. Верлока // Хим. и нефтегаз. машиностроение. – 2018. – № 5. – С. 3–9.

7. Капранова, А. Б. Стохастическое описание процесса формирования потоков сыпучих компонентов в аппаратах со щеточными элементами / А. Б. Капранова, И. И. Верлока // Теорет. основы хим. технологии. – 2018. – Т. 52, № 6. – С. 707–721. doi: 10.1134/S0040357118050044

8. Kapranova, A. B. On the Features of Estimating the Coefficient of Inhomogeneity of a Loose Mixture During the Operation of a Gravitational Device / A. B. Kapranova, I. I. Verloka // J. Chem. Eng. Process Technol. – Vol. 9. – P. 53. doi: 10.4172/2157-7048-C3-018

9. Исследование качества смеси на первой стадии работы аппарата гравитационного типа / А. Б. Капранова [и др.] // Российский хим. журн. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 48–50.

On the Influence of a Complex Parameter of the Gravitational Apparatus on the Quality of the Mixture after the First Stage of Mixing

A. B. Kapranova, I. I. Verloka, P. A. Yakovlev, D. D. Bakhaeva

*Department of Theoretical Mechanics and Resistance of Materials,
Yaroslavl State Technical University,
Yaroslavl, Russia; kapranova_anna@mail.ru*

Keywords: gravity mixer; heterogeneity coefficient; chipper; batch blending; bulk materials; distribution functions; brush elements.

Abstract: A method for assessing the quality of the mixture at the first stage of mixing loose components in a gravitational type mixer based on a stochastic model of the process of formation of rarefied flows is proposed. The analysis dependencies obtained for the heterogeneity coefficient of the free-flowing mixture showed a significant influence on the mixing process of a complex structural-mode parameter characterizing the degree of deformation of the brush elements.

References

1. Kapranova A.B., Bakin M.N., Verloka I.I., Zaytsev A.I. [Methods of describing the movement of solid dispersed media in different planes for sections of the mixing drum], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 296-304, doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.296-304 (In Russ., abstract in Eng.)

2. Bakin M.N., Kapranova A.B., Verloka I.I. [Investigation of the distribution of bulk components in the working volume of the drum-ribbon mixer], *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental research], 2014, no. 5-5, pp. 928-933. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Kapranova A.B., Verloka I.I., Lebedev A.E., Zaitzev A.I. The Model of Dispersion of Particles During Their Flow from Chipping the Surface, *Czasopismo techniczne. Mechanika*, 2016, vol. 113, no. 2, pp. 145-150.

4. Kapranova A.B., Verloka I.I. [On assessing the content of a key component aftershock dispersion of bulk materials at the initial stage of batch mixing], *Vestnik*

Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta [Ivanovo State Power Engineering University Bulletin], 2016, no. 3, pp. 78-83, doi: 10.17588/2072-2672.2016.3.078-083 (In Russ.)

5. http://www.iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJMET/VOLUME_9_IS_SUE_2/IJMET_09_02_045.pdf (accessed 28 December 2018).

6. Kapranova A.B., Bakin M.N., Verloka I.I. [Modeling the quality criterion of the mixture in the volume of a bar-bath-tape device], *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2018, no. 5, pp. 3-9. (In Russ.)

7. Kapranova A.B., Verloka I.I. [A stochastic description of the process of forming streams of loose components in devices with brush elements], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical technology], 2018, vol. 52, no. 6, pp. 707-721, doi: 10.1134/S0040357118050044 (In Russ.)

8. Kapranova A.B., Verloka I.I. On the Features of Estimating the Coefficient of Inhomogeneity of a Loose Mixture During the Operation of a Gravitational Device, *J. Chem. Eng. Process Technol.*, vol. 9, pp. 53, doi: 10.4172/2157-7048-C3-018

9. Kapranova A.B., Verloka I.I., Yakovlev P.A., Bakhayeva D.D. [The study of the quality of the mixture in the first stage of the operation of a gravitational-type apparatus], *Rossiyskiy khimicheskii zhurnal* [Russian Chemical Journal], 2018, vol. 62, no. 4, pp. 48-50. (In Russ., abstract in Eng.)

Über den Einfluss des komplexen Parameters des Gravitationsgeräts auf die Qualität der Mischung nach der ersten Mischstufe

Zusammenfassung: Es ist ein Verfahren zur Bewertung der Qualität der Mischung in der ersten Stufe des Mischens von Schüttgutkomponenten in einem Gravitationsstyp-Mischer vorgeschlagen, das auf einem stochastischen Modell des Prozesses der Bildung der verdünnten Ströme basiert. Die Analyse der erhaltenen Abhängigkeiten für den Heterogenitätskoeffizienten der Schüttmischung zeigte einen wesentlichen Einfluss auf den Mischvorgang eines komplexen konstruktiven Betriebsparameters, der den Verformungsgrad der Bürstenelemente kennzeichnet.

Sur l'influence du paramètre complexe de l'appareil de gravité sur la qualité du mélange après la première étape du mélange

Résumé: Est proposée une méthode d'évaluation de la qualité du mélange à la première étape du mélange des composants en vrac dans un mélangeur du type gravitationnel sur le modèle stochastique du processus de la formation de flux épars. L'analyse les contraintes résultant pour le coefficient d'hétérogénéité du mélange en vrac a montré un impact significatif sur le processus de mélange d'un paramètre complexe qui caractérise le degré de déformation des éléments de brosse.

Авторы: *Капранова Анна Борисовна* – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической механики и сопротивления материалов; *Верлока Иван Игоревич* – аспирант кафедры теоретической механики и сопротивления материалов; *Яковлев Павел Андреевич* – магистрант; *Бахаева Дарья Дмитриевна* – магистрант, ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Россия.

Рецензент: *Першин Владимир Федорович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМОВАНИЯ ВЯЗКО-ПЛАСТИЧНОГО МАТЕРИАЛА В ФИЛЬЕРАХ ПЛОСКОМАТРИЧНОГО ГРАНУЛЯТОРА

М. В. Севостьянов, А. В. Осокин

*Кафедра «Технологические комплексы, машины и механизмы»,
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический
университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Россия; msev31@mail.ru*

Ключевые слова: канал формования; плоскоматричный гранулятор; техногенные материалы; фильера.

Аннотация: Представлены аналитические исследования процесса движения вязко-пластичного материала по цилиндрическому каналу фильеры с конической заходной частью. Полученные основные выражения, характеризующие данный процесс: уравнение сопротивления канала формования, выражение для определения его длины, изменения осевого давления и бокового распора представляют научный интерес в области компактирования вязко-пластичных техногенных материалов с различными физико-механическими характеристиками. Определено направление дальнейших теоретических исследований. Актуальность статьи обусловлена установлением закономерностей протекания процесса уплотнения дисперсных материалов в цилиндрическом канале фильеры пресс-матрицы в зависимости от внешних воздействий. Полученные аналитические выражения рекомендуется использовать при проектировании новых образцов плоскоматричных грануляторов.

Введение

При утилизации техногенных материалов возможно получение широкого ассортимента продукции методом компактирования (формования). Известен и широко используется модельный ряд агрегатов, различных по конструктивно-технологическим особенностям для формования материалов. Выбор оборудования зависит от технологии производства основной продукции и исходных свойств сырья. Такие физико-механические характеристики, как вязкость, анизотропность материалов, насыпная плотность, коэффициент уплотнения и другие существенно влияют на процесс переработки шихты, в том числе и на процесс формования материалов в машинах для компактирования (брикетеры, экструдеры, грануляторы, прессы и др.), который подчиняется общим закономерностям. Однако процесс продвижения материала внутри канала формования (фильеры) малоизучен. Его изучение определяют количественные и качественные характеристики выпускаемой продукции: прочность, плотность гранул, производительность гранулятора, энергоёмкость процесса формования и др.

Постановка задачи. Образование гранул при экструзионном формовании происходит под действием всестороннего сжатия при прохождении перерабатываемого материала через каналы определенного профиля. Форма канала может быть различной и определяется физико-механическими характеристиками перера-

батываемого материала. При этом механизм деформации материала под действием внешних сил, вне зависимости от физико-механических и реологических характеристик, подчиняется общим закономерностям. В их основе лежит процесс изменения под внешним воздействием дислокации структуры (взаиморасположения твердой, жидкой и газообразной фаз) и соответствующих реологических свойств материала [1 – 5]. Вышеуказанный механизм деформации материала в процессе воздействия на него со стороны внешней среды подлежит детальному изучению и аналитическому описанию. Уплотнение материала в результате его постадийной деформации необходимо рассматривать как с ракурса внешнего воздействия рабочих органов формирующего оборудования, так и со стороны сил, действующих внутри канала.

Анализ условий уплотнения техногенных материалов в фильере

Наиболее распространены машины непрерывного действия (грануляторы и штемпельные брикетные прессы), в которых материал проходит через рабочие органы непрерывно, с открытыми каналами формования. В открытом канале противодавление создается подвижным упором, которым служат ранее спрессованные порции материала. Противодавление, обеспечивающее сжатие материала вдоль оси канала, возникает в результате трения материала о стенки канала.

Сопротивление канала определяет плотность получаемых гранул: чем выше сопротивление канала, тем большее давление необходимо приложить к материалу для его проталкивания и тем выше плотность получаемых гранул. Разными исследователями предлагались различные варианты математического описания данного процесса. Анализируя эти уравнения, автор работы [6] пришел к выводу, что наиболее точно физическую сущность процесса описывает уравнение [6, 7]

$$P = C \left(e^{a(\rho - \rho_0)} - 1 \right), \quad (1)$$

где C – постоянный параметр, Па; a – эмпирический параметр, характеризующий свойства материала, $\text{м}^3/\text{кг}$; ρ_0 , ρ – исходная насыпная плотность пресуемого материала и его плотность в сформованном состоянии соответственно, $\text{кг}/\text{м}^3$.

При $P = C(e - 1)$ плотность $\rho = \rho_0 + 1/a$. Величина $1/a$ представляет собой приращение начальной плотности материала при данном давлении.

Значения эмпирических параметров C и a зависят от структурно-механических свойств материала (начальной плотности, влажности, температуры, крупности частиц) и определяют собой сопротивляемость материала сжатию. Указанные параметры находятся экспериментально для каждого материала.

При равномерной подаче материала в камеру гранулирования за время одного оборота пресс-валка вокруг оси водила (приводного вала) на рабочей поверхности пресс-матрицы образуется кольцевой слой материала высотой H с насыпной плотностью ρ_0 (рис. 1). Накатывающийся на материал пресс-валок сжимает слой материала между сближающимися рабочими поверхностями пресс-матрицы и пресс-валка. В грануляторах с кольцевой и плоской пресс-матрицей, в отличие от штемпельных прессов, камера сжатия материала вынесена за пределы канала формования и расположена в зоне захвата материала $\beta_{сж}$ (см. рис. 1, a , дуга AB). Давление сжатия при этом возрастает по кривой A_1B_1 от нуля в точке A_1 до максимального значения P в точке B_1 . Кривая A_1B_1 описывается уравнением (1).

Преодолевая сопротивление канала, осевое давление со стороны рабочего органа (пресс-валка) уменьшается. Для определения закона изменения осевого давления в канале переменного сечения рассмотрим равновесие выделенного слоя материала толщиной dx на небольшой глубине x_1 на первом участке (коническая часть) и глубине x_2 – на втором участке (цилиндрическая часть) (см. рис. 1, a). На него

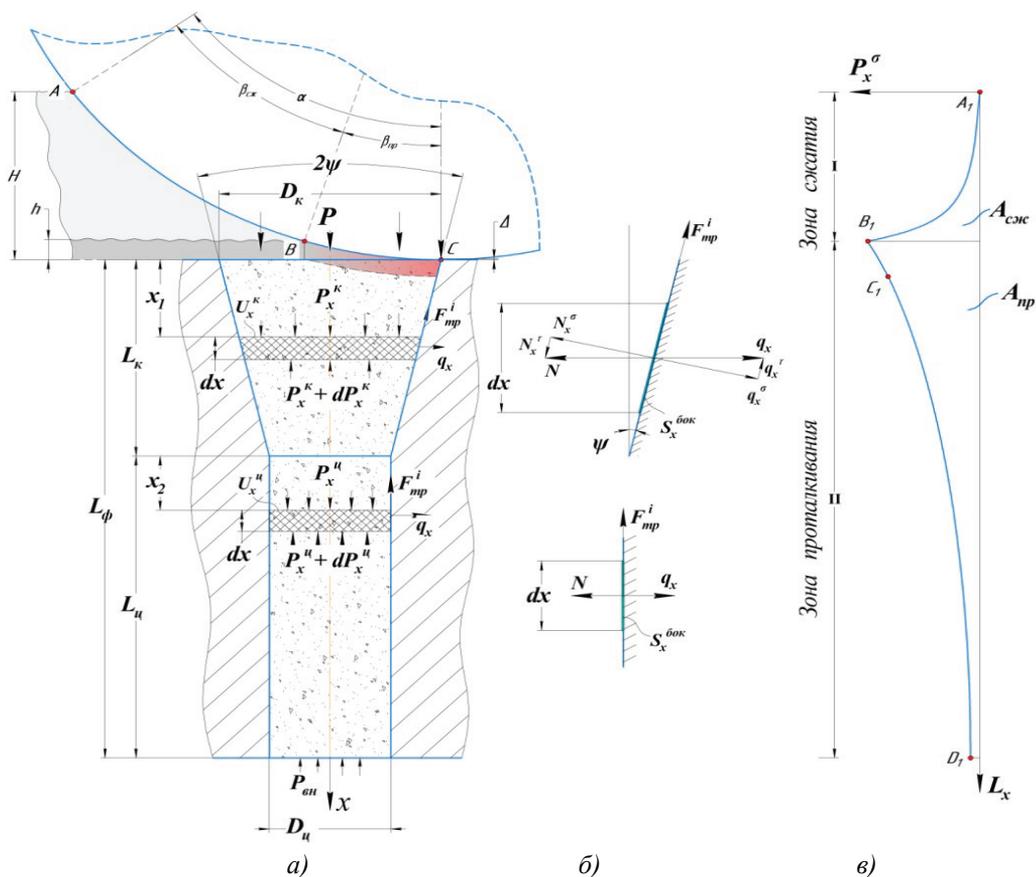


Рис. 1. Схема к расчету усилия экструдирования материала через фильеру с переменным сечением:

а – условие равновесия элементарного слоя материала; *б* – схема сил; *в* – график изменения давления экструдирования

действуют осевые давления: над слоем – P_x , под слоем – давление $(P_x + dP_x)$. Кроме того, в поперечном сечении по периметру U_x слоя действует боковое давление (боковой распор) q_x и обусловленная им сила внешнего трения $F_{тр}^i$ материала о поверхность канала формования.

В общем виде величина бокового распора q_x определяется по выражению [7]

$$q_x = \xi P_x + q_0, \quad (2)$$

где ξ – коэффициент бокового давления (бокового распора), $\xi = \mu / (1 - \mu) = \text{const}$ [6]; μ – коэффициент Пуассона; P_x – осевое давление, Па; q_0 – остаточное боковое давление, Па.

Первое слагаемое ξP_x представляет собой боковое давление, вызываемое осевой нагрузкой на материал, второе q_0 выражает остаточное боковое давление, обусловленное упругим расширением спрессованного материала. Эта часть бокового давления от осевого не зависит.

При гранулировании порошковых строительных материалов используют зависимость [1]

$$q_x = \xi P_x. \quad (3)$$

Значение ξ определяем по формуле [8]

$$\xi = \frac{\sigma_3}{\sigma_1} = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi},$$

где σ_1, σ_3 – главные нормальные напряжения, Па; φ – эффективный угол внутреннего трения, °.

Составим уравнения равновесия элементарного выделенного слоя в конической и цилиндрической частях соответственно:

$$P_x S_x - (P_x + dP_x) S_x - f_i q_x U_x^k \cos \psi dx - q_x U_x^k \sin \psi dx + q_x U_x^k \operatorname{tg} \psi \cos \psi dx = 0; \quad (4)$$

$$P_x S_x - (P_x + dP_x) S_x - f_i (\xi P_x + q_0) U_x^H dx = 0, \quad (5)$$

где S_x – площадь поперечного сечения канала на глубине x , м²; f_i – коэффициент внешнего трения; q_x – величина бокового давления, Па; U_x – периметр поперечного сечения слоя на глубине x , м; ψ – угол наклона стенок канала к ее оси, °.

При этом имеем:

– коническая часть:

$$S_{x \text{бок}} = \frac{U_x^k dx}{\cos \psi}; \quad (6)$$

$$N^\sigma = q_x^\sigma S_{x \text{бок}} = q_x U_x^k dx; \quad (7)$$

$$N^\tau = q_x^\tau S_{x \text{бок}} = q_x U_x^k \operatorname{tg} \psi dx; \quad (8)$$

$$F_{\text{тр}}^i = f_i N^\sigma = q_x U_x^k dx; \quad (9)$$

– цилиндрическая часть:

$$S_{x \text{бок}} = U_x^H dx; \quad (6a)$$

$$N^\sigma = q_x S_{x \text{бок}} = (\xi P_x + q_0) U_x^H dx; \quad (7a)$$

$$F_{\text{тр}}^i = f_i N = f_i (\xi P_x + q_0) U_x^H dx, \quad (9a)$$

где $S_{x \text{бок}}$ – площадь боковой поверхности элементарного слоя, м²; q_x^σ , q_x^τ – нормальная и касательная составляющие бокового распора соответственно, Па; N^σ , N^τ – нормальная и касательная составляющие реакции стенки канала фильеры N соответственно, Н.

Разделяем переменные и интегрируем выражения (4) и (5):

– коническая часть

$$\int_P^{P_1} \frac{dP_x}{\xi P_x + q_0} = - \int_0^{x_1} \frac{4 f_i \cos \psi}{D_k - 2 x_1 \operatorname{tg} \psi} dx; \quad (10)$$

– цилиндрическая часть

$$\int_{P_1}^{P_2} \frac{dP_x}{q_0 + \xi P_x} = - \int_0^{x_2} f_i \frac{U_x^H}{S_x} dx. \quad (10a)$$

После соответствующих преобразований получим уравнения изменения осевого давления по длине конической и цилиндрической частей фильеры соответственно:

$$P_x^k = \left(P + \frac{q_0}{\xi} \right) \left(\frac{D_k - 2x_1 \operatorname{tg} \psi}{D_k} \right)^{\frac{2f_i \cos \psi}{\operatorname{tg} \psi} \xi} - \frac{q_0}{\xi}, \quad (11)$$

$$P_x^u = \left(P_1 + \frac{q_0}{\xi} \right) e^{-\xi f_i \frac{4}{D_u} x_2} - \frac{q_0}{\xi}, \quad (12)$$

где D_k – диаметр входного сечения конической части канала, м; P – нормальная составляющая давления со стороны формирующего вала, Па; P_1 – давление на входе в цилиндрическую часть, Па.

Закономерность изменения бокового давления q_x по длине конической и цилиндрической частей канала можно определить, подставив в уравнение (2) значение P_x из уравнения (11) и (12) соответственно. После преобразований получим:

$$q_x^k = (\xi P + q_0) \left(\frac{D_k - 2x \operatorname{tg} \psi}{D_k} \right)^{\frac{2f_i \cos \psi}{\operatorname{tg} \psi} \xi}; \quad (13)$$

$$q_x^u = (\xi P_1 + q_0) e^{-\xi f_i \frac{4}{D_u} x_2}. \quad (14)$$

Решая уравнение (11) относительно P при $x_1 = L_k$ и $P_x = P_{в.к}$ (так как есть сопротивление со стороны цилиндрической части) получим выражение для определения сопротивления конической части фильеры

$$P_k = \left(P_{в.к} + \frac{q_0}{\xi} \right) \left(\frac{D_k}{D_u} \right)^{\frac{2f_i \cos \psi}{\operatorname{tg} \psi} \xi} - \frac{q_0}{\xi}, \quad (15)$$

где $P_{в.к}$ – давление на выходе из конической части фильеры, Па; D_u – диаметр цилиндрической части фильеры, м.

Аналогичным образом определяем сопротивление цилиндрической части фильеры из выражения (12) при $x_2 = L_u$ и $P_x = 0$ (так как противодействие на выходе из фильеры отсутствует)

$$P_u = \frac{q_0}{\xi} \left[e^{\xi f_i \frac{4}{D_u} L_u} - 1 \right]. \quad (16)$$

Тогда полное сопротивление фильеры получим, подставив в (15) вместо $P_{в.к}$ правую часть из выражения (16). После соответствующих преобразований имеем

$$P_\Phi = \frac{q_0}{\xi} \left[e^{4\xi f_i \frac{L_\Phi - L_k}{D_u} \left(\frac{D_k}{D_u} \right)^{\frac{2f_i \cos \psi}{\operatorname{tg} \psi} \xi} - 1} \right]; \quad (17)$$

где L_Φ – длина фильеры, м.

Сопrotивление фильеры, полученное по выражению (17), есть противодавление, которое необходимо для получения гранул заданной плотности ρ .

Решая совместно уравнения (1) и (17) относительно L_{ϕ} , получаем

$$L_{\phi} = \frac{D_{\text{ц}}}{(1-n)4f_i\xi} \ln \left[\left[\frac{C\xi}{q_0} (e^{a(\rho-\rho_0)} - 1) + 1 \right] \left(\frac{D_{\text{ц}}}{D_{\text{к}}} \right)^{\frac{2f_i \cos \psi}{\text{tg} \psi} \xi} \right] \quad (18)$$

где n – относительная длина конической части $L_{\text{к}}$, выраженная в долях от общей длины фильеры L_{ϕ} . Например, $n = 0,2$ означает, что длина конической части составляет 20 % от общей длины фильеры, при $n = 0,35$ – соответственно 35 %.

Длина канала фильеры L_{ϕ} , определенная по (18), обеспечивает получение заданной плотности ρ сформованных гранул.

В выражении (18) видно, что длина канала фильеры пропорциональна начальной плотности шихты ρ_0 . Чем больше будет начальная плотность прессуемого материала, тем меньше давление необходимо приложить со стороны пресс-валка для получения плотности ρ готовой гранулы, и тем меньше должно быть сопротивление канала формования и, как следствие, меньше должна быть длина фильеры L_{ϕ} . Это, в свою очередь, снижает металлоемкость и энергозатраты гранулятора. Отсюда закономерен вопрос о необходимости наличия в конструкции гранулятора дополнительного устройства для предуплотнения исходной шихты.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана конструкция плоскоматричного гранулятора с устройством для предварительного уплотнения материала [9]. Разработанный агрегат (рис. 2) наиболее

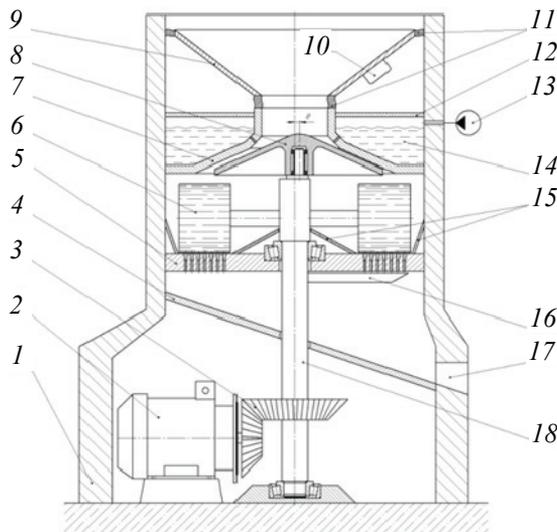


Рис. 2. Гранулятор волокнистых материалов:

1 – корпус; 2 – электродвигатель; 3 – механическая передача; 4 – наклонный стол; 5 – плоская неподвижная пресс-матрица; 6 – прессующие вальцы; 7 – наружный неподвижный конус; 8 – внутренний подвижный конус; 9 – загрузочная воронка; 10 – высокочастотный генератор; 11 – упругие элементы; 12 – герметизирующая крышка; 13 – насос; 14 – резервуар; 15 – наклонные борта; 16 – нож для срезания гранул; 17 – выгрузочное отверстие; 18 – вал

целесообразно использовать при экструдировании материалов с низкой насыпной плотностью ($\rho_0 \leq 200 \dots 300 \text{ кг/м}^3$), таких как отходы перлитового, вермикулитового производства – при получении адсорбентов; целлюлозно-бумажных отходов (ЦБО) – при производстве гранулированных стабилизирующих добавок (ГСД) щебеночно-мастичного асфальтобетона (ЩМА) и др. [10].

Рассмотренный процесс истечения материала по каналам формирования реализуется чаще всего при переработке вязко-пластичных шихт строительной отрасли. Однако с появлением нового вида дорожных покрытий – щебеночно-мастичных асфальтобетонов возникла потребность в производстве ГСД как одного из важных компонентов смеси. Основу ГСД составляют тонкоизмельченные техногенные волокнистые материалы – ЦБО.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что характер движения материалов ввиду его специфических свойств (малая сыпучесть и насыпная плотность, высокие влагопоглощение и коэффициент внутреннего трения, повышенная склонность к слеживаемости, неравномерное распределение материала по рабочей камере машины и др.) отличается от рассмотренного выше.

Процесс экструдирования волокнистых материалов требует учета вышеуказанных параметров, а также таких закономерностей, как неравномерного распределения скоростного потока по сечению фильеры (с максимальным его значением по оси фильеры), повышенных значений коэффициентов внутреннего и внешнего трения и др. Указанные факторы учтены при совершенствовании конструкции плоскоматричного гранулятора и технологических режимов его работы.

Выводы

В результате теоретических исследований процесса формирования вязко-пластичного материала в фильерах плоскоматричного гранулятора получены аналитические зависимости, позволяющие определять значения сопротивления материала при его экструдировании, геометрические параметры фильер, соотношения отдельных частей их профиля и др. Полученные уравнения показывают, что сопротивление формирующего канала с конической заходной частью изменяется по степенной зависимости и зависит от геометрических параметров канала ($D_k, D_{\text{ц}}, \psi, L_k, L_{\text{ц}}$) и физико-механических свойств (f_i и ξ) экструдруемой шихты.

С учетом проведенных теоретических исследований и установленных закономерностей разработана патентозащищенная конструкция специального устройства для предуплотнения техногенных волокнистых материалов с низкой насыпной массой.

Работа выполнена в рамках Программы развития опорного университета на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова».

Список литературы

1. Севостьянов, М. В. Пресс-валковый экструдер для формирования техногенных порошкообразных материалов : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / Севостьянов Максим Владимирович. – Белгород, 2006 – 250 с.
2. Фадеева, В. С. Формирование структуры пластичных паст строительных материалов при машинной переработке / В. С. Фадеева. – М. : Стройиздат, 1972. – 223 с.

3. Технические основы переработки и утилизации техногенных материалов / В. С. Севостьянов [и др.]. – Белгород : Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2011. – 268 с.
4. Булатов, И. А. Разработка процесса прессового гранулирования мелкодисперсных сред на примере минеральных порошков и древесных отходов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08, 05.02.13 / И. А. Булатов. – М., 2012 – 19 с.
5. Севостьянов, М. В. Расчет и проектирование оборудования для компактирования техногенных материалов / М. В. Севостьянов. – Белгород : Изд-во БГТУ, 2017. – 205 с.
6. Мельников, С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм : учеб. пособие / С. В. Мельников. – Л. : Колос, 1978. – 560 с.
7. Кучинская, З. М. Оборудование для сушки, гранулирования и брикетирования кормов / З. М. Кучинская, В. И. Особов, Ю. Л. Фрегер. – М. : Агропромиздат, 1988. – 208 с.
8. Машины и аппараты химических производств: примеры и задачи : учеб. пособие / И. В. Доманский, В. П. Исаков, Г. М. Островский [и др.] ; под общ. ред. В. Н. Соколова. – Л. : Машиностроение, 1982. – 384 с.
9. Полезная модель к патенту 135539 Российская Федерация, МПК В01J 2/20. Гранулятор волокнистых материалов / Севостьянов М. В., Ильина Т. Н., Осокин А. В., Севостьянов В. С., Сабитов Р. А. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «БГТУ им. В. Г. Шухова». – № 2013130468/05 ; заявл. 02.07.2013 ; опубл. 20.12.2013, Бюл. № 35. – 2 с.
10. Ресурсосберегающий технологический комплекс для производства гранулированных стабилизирующих добавок щебеночно-мастичного асфальтобетона / М. В. Севостьянов [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 2. – С. 272 – 279. doi: 10.17277/vestnik.2016.02.pp.272-279

Analytical Studies of the Process of Molding a Viscous-Plastic Material in the Spinnerets of a Flat-Matrix Granulator

M. V. Sevostyanov, A. V. Osokin

*Department of Technological Complexes, Machines and Mechanisms,
V.G. Shukhov Belgorod State Technological University, Belgorod, Russia;
msev31@mail.ru*

Keywords: channel molding; flat matrix granulator; man-made materials; die.

Abstract: The paper presents analytical studies of the process of the movement of a visco-plastic material along a cylindrical channel of the spinneret with a tapered end. The basic expressions characterizing this process – the equation of formation channel resistance, the expression for determining its length, changes in axial pressure and lateral spread – are of scientific interest in the field of compaction of viscous-plastic man-made materials with different physical and mechanical characteristics. The direction of further theoretical studies is outlined. The relevance of the article is due to the establishment of the laws governing the process of compacting dispersed materials in the cylindrical channel of the die of the press matrix, depending on external influences. The obtained analytical expressions are recommended to be used when designing new samples of flat-matrix granulators.

References

1. Sevost'yanov M.V. *PhD Dissertation (Technical)*, Belgorod, 2006, 250 p. (In Russ.)

2. Fadeyeva V.S. *Formirovaniye struktury plastichnykh past stroitel'nykh materialov pri mashinnoy pererabotke* [Formation of the structure of plastic pastes of building materials during machine processing], Moscow: Stroyizdat, 1972, 223 p. (In Russ.)
3. Sevost'yanov V.S., Shinkarev L.I., Sevost'yanov M.V., Makridin A.A., Solopov N.V. *Tekhnicheskiye osnovy pererabotki i utilizatsii tekhnogennykh materialov* [Technical basis for the processing and disposal of man-made materials], Belgorod: Izdatel'stvo BGTU im. V. G. Shukhova, 2011, 268 p. (In Russ.)
4. Bulatov I.A. *Extended abstract of candidate's of technical thesis*, Moscow, 2012, 19 p. (In Russ.)
5. Sevost'yanov M.V. *Raschet i proyektirovaniye oborudovaniya dlya kompaktirovaniya tekhnogennykh materialov* [Calculation and design of equipment for compacting man-made materials], Belgorod: Izdatel'stvo BGTU, 2017, 205 p. (In Russ.)
6. Mel'nikov S.V. *Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya zhivotnovodcheskikh ferm* [Mechanization and automation of livestock farms], Leningrad: Kolos, 1978, 560 p. (In Russ.)
7. Kuchinskas Z.M., Osobov V.I., Freger Yu.L. *Oborudovaniye dlya sushki, granulirovaniya i briketirovaniya kormov* [Equipment for drying, granulating and briquetting feed], Moscow: Agropromizdat, 1988, 208 p. (In Russ.)
8. Domanskiy I.V., Isakov V.P., Ostrovskiy G.M. [et al.], Sokolov V.N. [Ed.]. *Mashiny i apparaty khimicheskikh proizvodstv: primery i zadachi* [Machines and equipment for chemical production: examples and objectives. Training commander], Leningrad: Mashinostroyeniye, 1982, 384 p. (In Russ.)
9. Sevost'yanov M.V., Il'ina T.N., Osokin A.V., Sevost'yanov V.S., Sabitov R.A. *Granulyator voloknistykh materialov* [Granulator fibrous materials], Russian Federation, 2013, Poleznaya model' k pat. 135539. (In Russ.)
10. Sevost'yanov M.V., Il'ina T.N., Kuznetsova I.A., Osokin A.V., Martakov I.G. [Resource-saving technological complex for the production of granulated stabilizing additives of crushed stone-mastic asphalt concrete], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 2, pp. 272-279, doi: 10.17277/vestnik.2016.02.pp.272-279 (In Russ., abstract in Eng.)

Analytische Untersuchungen des Formprozesses des viskos-elastischen Kunststoffes in Spinndüsen des Flachmatrix-Granulators

Zusammenfassung: Es sind analytische Untersuchungen des Bewegungsprozesses des viskos-plastischen Materials in einem zylindrischen Kanal der Spinndüse mit konisch zulaufendem Ende vorgestellt. Die erhaltenen Hauptausdrücke, die diesen Prozess charakterisieren: Die Gleichung des Formationskanalwiderstandes, der Ausdruck zur Bestimmung seiner Länge, Änderungen des axialen Drucks und der seitlichen Verteilung sind auf dem Gebiet der Verdichtung von viskosen Kunststoffen mit unterschiedlichen physikalischen und mechanischen Eigenschaften von wissenschaftlichem Interesse. Die Richtung weiterer theoretischer Studien ist bestimmt. Die Aktualität des Artikels beruht auf der Festlegung der Gesetze, die den Prozess des Verdichtens dispergierter Materialien im zylindrischen Kanal der Spinndüse der Pressmatrix abhängig von äußeren Einflüssen regeln. Die erhaltenen analytischen Ausdrücke werden beim Entwerfen der neuen Muster der Flachmatrix-Granulatoren empfohlen.

Études analytiques du processus du moulage des matières plastiques visco-visqueuses dans les granulateurs à matrice plate

Résumé: Sont présentées les études analytiques du processus du déplacement du matériau visco-plastique sur le canal cylindrique de la filière avec une partie conique. Les principales expressions qui caractérisent ce processus sont: l'équation de la résistance du canal de formage, l'alignement pour déterminer sa longueur, les variations de la pression axiale et de la vitesse latérale; ils présentent un intérêt scientifique dans le domaine de la compactage des matériaux technogènes visco-plastiques ayant des caractéristiques physico-mécaniques différentes. Est définie la direction ultérieure des études théoriques. L'actualité de l'article est due à l'installation de la régularité du processus de compactage des matériaux dispersés dans le canal cylindrique de la filière de la matrice de presse en fonction des influences extérieures. Il est recommandé d'utiliser les expressions analytiques obtenues lors de la conception de nouveaux échantillons de granulateurs à matrice plate.

Авторы: *Севостьянов Максим Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические комплексы, машины и механизмы»; *Осокин Антон Владиславович* – аспирант кафедры «Технологические комплексы, машины и механизмы», ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Россия.

Рецензент: *Уваров Валерий Анатольевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплогасоснабжение и вентиляция», ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Россия.

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ ПОМЕЩЕНИЙ

Е. Н. Туголуков¹, С. Ю. Алексеев², Т. П. Дьячкова¹,
Е. А. Буракова¹, Б. Езеддин¹

*Кафедра «Техника и технологии производства нанопродуктов» (1),
ФГБОУ ВО «ТГТУ»; г. Тамбов, Россия; tugolukov.en@mail.ru;
ОАО «Корпорация «Росхимзащита» (2), г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: математическое моделирование; метод конечных интегральных преобразований; температурные поля; энергосбережение.

Аннотация: Представлена методика расчета роторного регенеративного теплообменника для рекуперации тепла в системах приточно-вытяжной вентиляции помещений, основанная на использовании аналитических решений задач теплопроводности для математического моделирования нестационарных температурных полей элементов ротора и омывающего их воздушного потока. В постановке задачи теплопроводности для элементов ротора используется расчетное температурное поле элемента в момент окончания контакта с воздушным потоком одной температуры в качестве начального температурного распределения для очередного участка контакта с воздушным потоком другой температуры.

В настоящее время решение задач энергосбережения в различных областях является актуальным направлением инженерной и научно-исследовательской деятельности. Несмотря на высокую стоимость тепловой энергии и невозможность запасов широко используемых органических энергоносителей, существенные тепловые потери присутствуют во многих сферах человеческой деятельности.

Значительное количество тепла теряется при вентиляции производственных, служебных и жилых помещений в холодное время года. Работа кондиционеров в жаркую погоду также весьма энергозатратна. При этом минимально допустимая кратность воздухообмена для различных помещений регламентируется соответствующими нормативными документами. Например, при вентиляции помещения объемом 1000 м³, коэффициенте воздухообмена, равном 1, и разности температур в помещении и окружающей среде 20 °С мощность тепловых потерь с отводимым воздухом составит 6,7 кВт, что может достигать 40 – 50 % общих затрат тепла на отопление.

Известен ряд систем рекуперации тепла для систем с приточно-вытяжной вентиляцией помещений, обеспечивающих частичный возврат тепловой энергии при передаче ее от отводимого к нагнетаемому воздуху. Одной из наиболее энергоэффективных является система с роторным регенеративным теплообменником (рис. 1). Данная система, несмотря на относительную сложность и необходимость периодического обслуживания, имеет период окупаемости менее 4 лет.

Роторный регенеративный теплообменник может быть использован и в жаркую погоду, уменьшая количество тепла, приносимого свежим воздухом, и снижая затраты на работу систем кондиционирования воздуха. Ротор приводится

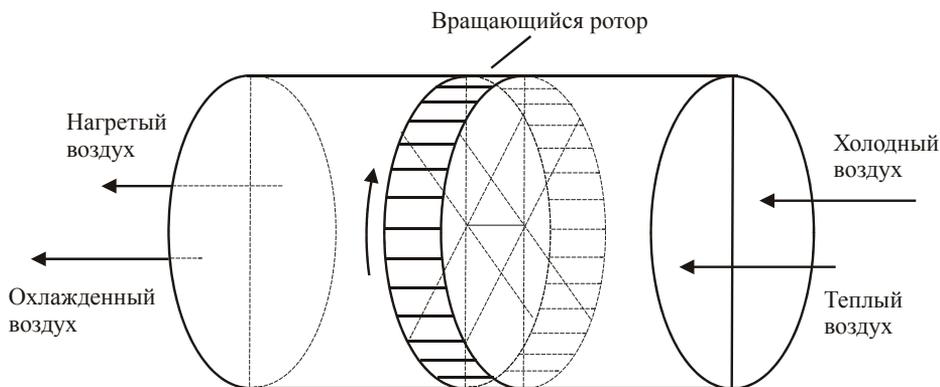


Рис. 1. Схема роторного регенеративного теплообменника

в движение как автономным приводом, так и воздушными потоками в системах с естественной или вынужденной вентиляцией. Ротор также может выполнять функции вентилятора.

Многообразие вариантов использования роторного регенеративного теплообменника, а также специфика работы конструктивных элементов ротора, контактирующих попеременно с воздушными потоками, имеющими различную температуру, требуют использования специфической методики расчета геометрических параметров элементов ротора, обеспечивающих высокую степень рекуперации тепловой энергии.

Расчетные методики, используемые в настоящее время, представляют собой системы алгебраических балансных и дополнительных уравнений, которые не позволяют определить значения циклически изменяющихся температур поверхности конструктивных элементов ротора, контактирующих с воздушными потоками, которые в действительности и определяют тепловые потоки и количество передаваемого тепла.

Предлагается математическая модель процесса рекуперации тепла в системах вентиляции помещений с роторным регенеративным теплообменником, обеспечивающая возможность расчета нестационарного температурного поля конструктивных элементов ротора, выполняющих функции теплового регенератора. Целью математического моделирования данного процесса является разработка методики инженерного расчета роторного регенеративного теплообменника для систем приточно-вытяжной вентиляции помещений.

Рассмотрим ротор, изготовленный из тонких элементов прямоугольного сечения (рис. 2). Если принять допущение о пренебрежимости тепловых потоков с торцевых поверхностей тонких элементов, то температурное поле элементов ротора может быть смоделировано решением задачи нестационарной теплопроводности для неограниченной пластины. Особенностью постановки такой задачи является использование расчетного температурного поля элемента в момент окончания контакта с воздушным потоком одной температуры в качестве начального температурного распределения для очередного участ-

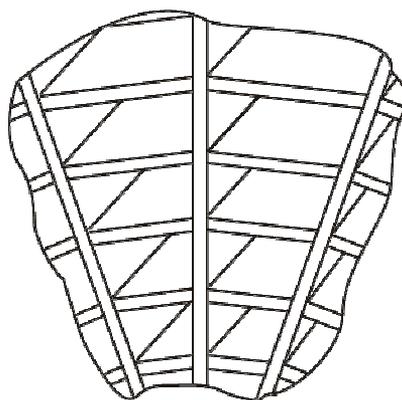


Рис. 2. Фрагмент возможной конструкции ротора регенеративного теплообменника

ка контакта с воздушным потоком другой температуры. Аналогичный подход к математическому моделированию нестационарных процессов тепло- и массопереноса описан в [1, 2].

Вследствие центральной симметрии температурного поля тонкого элемента рассмотрим решение задачи нестационарной теплопроводности для однослойной неограниченной пластины относительно температуры окружающей среды:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq R, \quad \tau > 0; \quad (1)$$

$$t(x, 0) = f(x) - t_c; \quad (2)$$

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

$$\lambda \frac{\partial t(R, \tau)}{\partial x} = \alpha t(R, \tau) = 0, \quad (4)$$

где $t(x, \tau)$ – температурное поле пластины (относительно температуры воздушного потока), °C, как функция координаты x , м, по толщине пластины и времени τ , с; R – полутолщина пластины, м; a – температуропроводность материала пластины, м²/с; λ – теплопроводность материала пластины, Вт/(м·К); $f(x)$ – начальное распределение температуры по толщине пластины, °C; α – коэффициент теплоотдачи от поверхностей пластины к воздушному потоку, Вт/(м²·К); t_c – температура окружающей среды, °C.

Решение задачи (1) – (4) получено методом конечных интегральных преобразований, теория которого разработана Н. С. Кошляковым [3].

Для исключения координаты x используется формула перехода к изображениям (весовая функция, равная 1, не приведена):

$$U(\mu, \tau) = \int_0^R t(x, \tau) W(\mu, x) dx. \quad (5)$$

Обратный переход осуществляется по формуле

$$t(x, \tau) = t_c + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U(\mu_n, \tau) W(\mu_n, x)}{Z_n}. \quad (6)$$

Ядро интегрального преобразования $W(\mu, x)$ является решением вспомогательной задачи (μ – параметр):

$$\frac{d^2 W(\mu, x)}{dx^2} + \mu^2 W(\mu, x) = 0, \quad 0 \leq x \leq R; \quad (7)$$

$$\frac{dW(\mu, x)}{dx} = 0; \quad (8)$$

$$\lambda \frac{dW(\mu, R)}{dx} + \alpha W(\mu, R) = 0. \quad (9)$$

Решение уравнения (7) (с точностью до постоянного множителя)

$$W(\mu_n, x) = \sin(\mu_n x + \varphi_n). \quad (10)$$

Числа φ_n, μ_n определяются из граничных условий (8), (9):

$$\varphi_n = \frac{\pi}{2} + \pi n, \quad (11)$$

где μ_n – n -й последовательный положительный корень уравнения

$$\frac{\lambda \mu}{\alpha} \sin(\mu R) - \cos(\mu R) = 0. \quad (12)$$

Тогда

$$W(x, \mu_n) = -\cos(\mu_n x); \quad (13)$$

$$Z_n = \int_0^R W^2(\mu_n, x) dx = \frac{1}{2\mu_n} (R\mu_n + \sin(\mu_n R)\cos(\mu_n R)). \quad (14)$$

Применяя преобразование (5) к задаче (1) – (4), переходим к изображениям:

$$\frac{dU(\mu_n, \tau)}{d\tau} + a\mu_n^2 U(\mu_n, \tau) = 0; \quad (15)$$

$$U(\mu_n, 0) = \int_0^R (f(x) - t_c) W(\mu_n, x) dx. \quad (16)$$

Решением задачи (15), (16) является функция

$$U(\mu_n, \tau) = U(\mu_n, 0) \exp(-a\mu_n^2 \tau). \quad (17)$$

Так как фрагмент ротора регенеративного теплообменника вступает в тепловое взаимодействие с потоком воздуха, имея температурный профиль, соответствующий конечному моменту времени предыдущего контакта с воздушным потоком другой температуры, то этот температурный профиль является начальным распределением температур для текущего интервала времени. Таким образом, начальным распределением $f(x)$ является температурный профиль, определяемый выражением (6) для момента времени τ_k , соответствующего концу предыдущего интервала времени.

Решение (6) можно записать в виде

$$t(x, \tau) = t_c - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\mu_n x) \exp(-a\mu_n^2 \tau), \quad (18)$$

где

$$A_n = \left(- \int_0^R (f(x) - t_c) \cos(\mu_n x) dx \right) / Z_n. \quad (19)$$

Интеграл в числителе (19) вычисляется аналитически

$$\begin{aligned} - \int_0^R (f(x) - t_c) \cos(\mu_n x) dx &= - \int_0^R (t_b(x, \tau_k) - t_c) \cos(\mu_n x) dx = \\ &= -(t_{cb} - t_c) \int_0^R \cos(\mu_n x) dx + \sum_{k=1}^{\infty} A_{kb} \exp(-a_b \mu_{kb}^2 \tau_k) \int_0^R \cos(\mu_{kb} x) \cos(\mu_n x) dx = \end{aligned}$$

$$= -\frac{(t_{cb} - t_c) \sin(\mu_n R)}{\mu_n} + \sum_{k=1}^{\infty} A_{kb} \exp(-a_b \mu_{kb}^2 \tau_k) \int_0^R \cos(\mu_{kb} x) \cos(\mu_n x) dx. \quad (20)$$

Индекс «b» указывает, что параметр относится к предыдущей области.

В свою очередь, если $\mu_{kb} - \mu_n \neq 0$, то

$$\int_0^R \cos(\mu_{kb} x) \cos(\mu_n x) dx = \frac{\sin((\mu_{kb} - \mu_n)R)}{2(\mu_{kb} - \mu_n)} + \frac{\sin((\mu_{kb} + \mu_n)R)}{2(\mu_{kb} + \mu_n)}. \quad (21)$$

иначе

$$\int_0^R \cos(\mu_{kb} x) \cos(\mu_n x) dx = \frac{1}{2\mu_n} (R\mu_n + \sin(\mu_n R) \cos(\mu_n R)). \quad (22)$$

Среднеобъемная температура

$$\bar{t}(\tau) = \frac{1}{R} \int_0^R t(x, \tau) dx = t_c - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n R} \sin(\mu_n R) \exp(-a \mu_n^2 \tau). \quad (23)$$

Пусть k_c – доля сечения канала, перекрываемая элементами ротора; d , d_c – диаметры ротора и ступицы ротора соответственно, м; l_p – толщина ротора (длина элементов ротора в направлении воздушного потока), м; ρ , C – плотность, кг/м³, и теплоемкость, Дж/(кг·К), материала ротора соответственно; N – скорость вращения ротора, об/с; V – объемный расход воздуха, отводимый из помещения, м³/с, при температуре в помещении t_b . Потерей активного сечения ротора из-за наличия перегородки, разделяющей потоки, будем пренебрегать.

Тогда начальная скорость отводимого воздуха в каналах ротора

$$U_{v0} = \frac{8V}{\pi(d^2 - d_c^2)(1 - k_c)}; \quad (24)$$

объемный расход воздуха, подводимый в помещение, м³/с, при температуре наружного воздуха t_n (без учета падений давления в воздушных каналах)

$$V_n = V \frac{t_n + 273}{t_b + 273}; \quad (25)$$

начальная скорость подводимого воздуха в каналах ротора

$$U_{n0} = \frac{8V_n}{\pi(d^2 - d_c^2)(1 - k_c)}; \quad (26)$$

время контакта элемента ротора с воздушным потоком

$$\tau_k = \frac{1}{2N}; \quad (27)$$

температурное поле воздушного потока при движении в каналах ротора в условиях теплообмена [4]

$$t_y(y) = t_n + (t_{0y} - t_n) \exp(-K_y y), \quad (28)$$

где y – продольная координата по толщине ротора, м; t_{0y} – температура воздушного потока перед ротором, °С; t_n – температура поверхности элемента ротора, °С;

$K_y = \frac{\alpha P}{G c_y}$; α – коэффициент теплоотдачи от воздушного потока к элементу ротора, Вт/(м²·К); P – омываемый периметр каналов ротора, м; G – массовый расход воздуха, кг/с; c_y – теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К).

Средняя температура воздушного потока по толщине ротора

$$\bar{t}_y = t_n + \frac{(t_{0y} - t_n)}{K_y l_p} (1 - \exp(-K_y l_p)). \quad (29)$$

Тепловая мощность, Вт, переносимая ротором в установившемся режиме,

$$P = 0,25\pi d^2 l k_c \rho C N (\bar{t}(\tau_k) - \bar{t}_b(\tau_k)). \quad (30)$$

Программа, реализующая решения (18) и (23) задачи (1) – (4) и дополнительные соотношения (24) – (30), построена на основе сочетания фрагментов, описывающих нестационарные температурные поля пластин и воздушного потока. В этом случае программу можно рассматривать как структурную модель теплообменника. Такая программа позволяет путем выполнения сравнительных расчетов выбрать рациональные размеры элементов ротора и режим его работы для заданных условий вентиляции помещения.

Алгоритм расчета позволяет определять температурные поля элементов ротора в процессе его вращения от начальных значений до установившегося состояния, при котором температурное поле элемента будет определяться только его пространственным положением и оставаться неизменным от оборота к обороту. Также определяются температурные поля воздушных потоков в каналах ротора, возвращаемая и теряемая тепловые мощности.

Так как температура воздушного потока в процессе теплообмена меняется по длине элементов ротора, расчет температурного поля регенеративного теплообменника выполняется итерациями. Результаты сравнительных расчетов температурных полей элементов ротора и воздушных потоков в процессе рекуперации тепла отводимого воздуха при вентиляции помещения позволили исследовать влияние параметров ротора и режимов его работы на степень рекуперации тепловой энергии.

Рекуперация тепла роторами, изготовленными из различных металлов и сплавов, при сохранении геометрических размеров не зависит от материала изготовления, так как толщина элементов ротора определяется прочностными требованиями. Частота вращения ротора в широком диапазоне значений также не влияет на степень рекуперации тепла.

Таким образом, варьируемыми параметрами при разработке конструкции ротора для заданных расходов воздуха и перепада температур являются диаметр и толщина ротора, а также доля сечения канала, перекрываемая элементами ротора.

Список литературы

1. Коновалов, В. И. О возможностях использования точных, интервальных и приближенных аналитических методов в задачах тепло- и массопереноса в твердых телах. Часть 1: Постановка проблемы. Точные аналитические методы / В. И. Коновалов, Е. Н. Туголуков, Н. Ц. Гагапова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1995. – Т. 1, № 1-2. – С. 75 – 90.

2. К расчету внутреннего тепло- и массопереноса и кинетики сушки и нагрева волокнистых материалов / В. И. Коновалов [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1997. – Т. 3, № 3. – С. 224 – 236.

3. Кошляков, Н. С. Уравнения в частных производных математической физики / Н. С. Кошляков, Э. Б. Глинер, М. М. Смирнов. – М. : Высш. школа, 1970. – 712 с.

4. Туголуков, Е. Н. Математическое моделирование технологического оборудования многоассортиментных химических производств / Е. Н. Туголуков. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 100 с.

Energy Saving in Ventilation Systems of Rooms

E. N. Tugolukov¹, S. Yu. Alekseev², T. P. Dyachkova¹,
E. A. Burakova¹, B. Ezzeddin¹

*Department of Engineering and Technology of Nanoproducts (1),
TSTU, Tambov, Russia; tugolukov.en@mail.ru;
Corporation Roskhimzashchita OJSC (2), Tambov, Russia*

Keywords: mathematical modeling; method of finite integral transformations; temperature fields; energy saving.

Abstract: The paper presents a method of calculating the rotor regenerative heat exchanger for heat recovery in the systems of supply and exhaust ventilation of rooms. This method is based on the use of analytical solutions of problems of thermal conductivity for mathematical modeling of non-stationary temperature fields of the rotor elements and the air flow washing them. In the formulation of the problem of heat conduction for the rotor elements, the calculated temperature field of the element at the time of the end of contact with the air flow of one temperature was used as the initial temperature distribution for the next section of contact with the air flow of other the temperature.

References

1. Konovalov V.I., Tugolukov Ye.N., Gatapova N.Ts. [About the possibilities of using exact, interval and approximate analytical methods in problems of heat and mass transfer in solids. Part 1: Problem Statement. Exact analytical methods], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 1995, vol. 1-2, pp. 75-90. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Konovalov V.I., Tugolukov Ye.N., Gatapova N.Ts., Khanuni S.S.S., Korobova I.L., Pakhomov A.N., Sergeeva E.A. [To the calculation of internal heat and mass transfer and kinetics of drying and heating of fibrous materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 1997, vol. 3, no. 3, pp. 224-236. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Koshlyakov N.S., Gliner E.B., Smirnov M.M. *Uravneniya v chastnykh proizvodnykh matematicheskoy fiziki* [Partial equations of mathematical physics], Moscow: Vysshaya shkola, 1970, 712 p. (In Russ.)

4. Tugolukov Ye.N. *Matematicheskoye modelirovaniye tekhnologicheskogo oborudovaniya mnogoassortimentnykh khimicheskikh proizvodstv* [Mathematical modeling of technological equipment of multi-assortment chemical production], Moscow: Mashinostroyeniye-1, 2004, 100 p. (In Russ.)

Energieeinsparung in Raumlüftungssystemen

Zusammenfassung: Es ist die Methode der Berechnung des regenerativen Rotationswärmetauschers für die Wärmerückgewinnung in Systemen der Belüftung und Entlüftung von Räumen, basierend auf analytischen Lösungen der Aufgaben der Wärmeleitfähigkeit für die mathematische Modellierung von nicht stationären Temperaturfeldern der Rotorelemente und deren Luftströmung vorgestellt. Bei der Formulierung des Problems der Wärmeleitung für die Rotorelemente wird das berechnete Temperaturfeld des Elements zum Zeitpunkt des Kontaktendes mit dem Luftstrom einer Temperatur als anfängliche Temperaturverteilung für den nächsten Kontaktabschnitt mit dem Luftstrom einer anderen Temperatur verwendet.

Économies d'énergie dans les systèmes de ventilation intérieure

Résumé: Est présentée la méthode de calcul de l'échangeur de chaleur régénératif rotatif pour la récupération de la chaleur dans les systèmes de ventilation des locaux basée sur l'utilisation de solutions analytiques des problèmes de conductivité thermique pour la modélisation mathématique des champs de température non statiques des éléments du rotor et du courant d'air. La définition du problème de conductivité thermique pour les éléments du rotor utilise le champ de température de l'élément au moment de la fin du contact avec le flux d'air d'une température comme limite de température initiale pour la prochaine partie du contact avec le flux d'air d'une autre température.

Авторы: *Туголуков Евгений Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; *Алексеев Сергей Юрьевич* – кандидат технических наук, доцент, начальник сектора по разработке автоматизированных средств и систем, ОАО «Корпорация «Росхимзащита», г. Тамбов, Россия; *Дьячкова Татьяна Петровна* – доктор химических наук, доцент, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов»; *Буракова Елена Анатольевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов»; *Езеддин Бахаа* – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Карнушкин Сергей Викторович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КОЛЛОИДНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ В ПОЛЯРНЫХ РАСТВОРИТЕЛЯХ ОКСИДА НАНОГРАФИТА, СИНТЕЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Е. Ю. Образцова, А. А. Дегтярев, А. В. Рухов, Е. С. Бакунин

*Кафедра «Химия и химические технологии», ФГБОУ ВО «ТГТУ»,
г. Тамбов, Россия; nikif83@mail.ru*

Ключевые слова: коллоидная устойчивость; оксид наногрфита; растворители; этиловый спирт.

Аннотация: Представлены условия получения окисленного наногрфита методом электрохимической эксфолиации из графитовой фольги марки «Графлекс» на постоянном токе в двухэлектродной ячейке в растворе серной кислоты. Экспериментальными и теоретическими методами изучена коллоидная устойчивость материала в полярных растворителях (вода и этиловый спирт) без добавления поверхностно-активных веществ, препятствующих агломерации частиц. Показано, что устойчивость оксида наногрфита в этаноле выше, чем в воде.

Оксид наногрфита (**GO**) – двумерный материал, состоящий из гидрофильных оксигенированных графеновых листов с кислородными функциональными группами на поверхности, в настоящее время привлекает большое внимание исследователей благодаря своим уникальным свойствам, делающим его перспективным материалом для использования в качестве модификатора, например лакокрасочных материалов или сорбции ионов из растворов [1, 2].

Для синтеза оксида наногрфита чаще всего используют метод Хаммерса [3] и его различные модификации. В результате окисления атомов углерода в графите происходит присоединение кислородсодержащих групп, что приводит к хаотичному расположению ароматических регионов (sp^2 -гибридизованные углеродные атомы) и окисленных алифатических регионов (sp^3 -углеродные атомы). Данные методы – достаточно длительные и дорогостоящие, так как предполагают использование сложного специфического оборудования и выполнение строгих технологических условий, а также отличаются большим количеством поллютантов.

Один из перспективных методов получения графеновых структур – электрохимическая эксфолиация графита как способ легкого, быстрого и экологически чистого производства искомого продукта [4 – 7].

Одной из основополагающих характеристик суспензии оксида наногрфита является ее способность противостоять агрегации, то есть коллоидная устойчивость. Как правило, в раствор вводят поверхностно-активные вещества (**ПАВ**), которые препятствуют агломерации частиц, но данный подход удорожает технологию, а в некоторых прикладных областях не применим [3 – 5].

Цель данной работы – изучение коллоидной устойчивости суспензии оксида графита, синтезированного электрохимическим способом в таких полярных растворителях, как вода и этиловый спирт без добавления ПАВ.

Методика экспериментов

Электрохимическая эксфолиация графеновых структур осуществлялась на постоянном токе в двухэлектродной ячейке, в качестве анода использована платина, катода – графитовая фольга марки «Графлекс», площадью 2 см². В качестве электролита – раствор серной кислоты. Плотность тока, пропускаемая через электроды, составляла 0,25 А/см².

Для оценки распределения частиц по размерам применялась программа JMicroVision 1.2.7. Объем выборки ограничивался сотней измерений. Коллоидная стабильность оксида нанографита оценивалась фотоколориметрическим методом посредством измерения ее оптической плотности в пробе с объемом 4 мкл и концентрацией суспензии 0,07 мг/мл, взятой из верхней части суспензии в неподвижно стоящей пробирке. Измерения проводились на длине волны 540 нм с интервалом в один день в течение 7 дней, затем интервал увеличивался до одной недели.

Дисперсии порошка GO испытаны в следующих растворителях: вода и этиловый спирт. Дисперсии обрабатывали ультразвуком (УЗ) в ультразвуковой ванне мощностью 100 Вт и частотой излучения 22 кГц в течение 5, 30 и 60 минут.

Экспериментальные данные и их обсуждение

Оксид нанографита получен электрохимическим способом в кислой среде. Процедура электрохимической эксфолиации нанографита содержит две стадии, первая из которых соответствует интеркаляции ионов из раствора электролита в пространство между графеновыми листами с образованием ковалентных связей, вторая – включает расслоение материала в результате протекания электрохимической реакции. Смещение потенциала графитового электрода в положительную сторону индуцирует образование высокореактивных видов кислорода (например, гидроксильные радикалы) от окисления молекул воды, которые, в свою очередь, вызывают значительное окисление и структурные деградации решетки углерода.

На рисунке 1 представлен микроснимок частиц синтезированного нанографита. Как показал элементный анализ соотношение С : О в образце составляет 2,6; латеральный размер частиц находится в пределах от 17 до 100 мкм.

Согласно предварительным испытаниям, синтезированный продукт сохраняет коллоидную стабильность в зависимости от типа растворителя и времени обработки УЗ до 60 суток в протонных растворителях, отличающихся яркой способностью образовывать водородные связи за счет подвижного протона, таких как вода и этиловый спирт (рис. 2). Данные растворители обладают к тому же высоким дипольным моментом μ и благодаря своим гидрофильным свойствам оксид нанографита с легкостью образует устойчивые суспензии с ним.

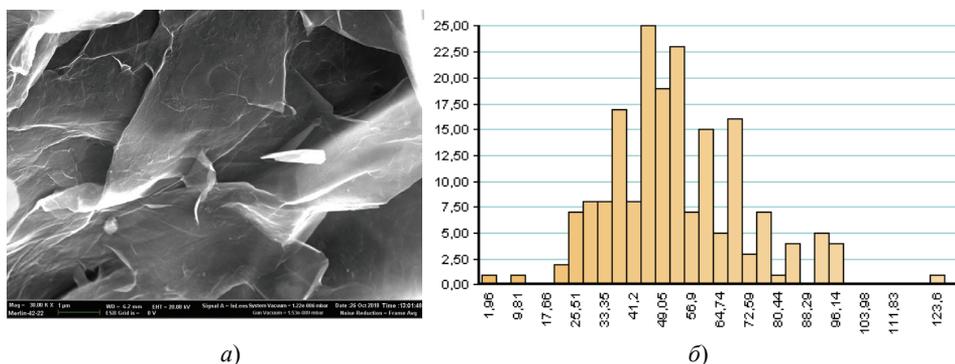


Рис. 1. Сканирующая электронная микроскопия GO (а) и распределение частиц по размерам (б)



а)



б)



в)

Рис. 2. Коллоидная устойчивость графеновой суспензии в растворителях в течение 1 и 24 часов (а и б) и 60 суток (в):
 1, 2, 3 – вода; 4, 5, 6 – этиловый спирт
 при времени обработки ультразвуком:
 1, 4 – 5 минут, 2, 5 – 30 минут, 3, 6 – 90 минут

Данные визуальных наблюдений совпадают с фотоколориметрическим исследованием. Оптическая плотность суспензий оксида нанографита зависит от типа растворителя и времени обработки УЗ (табл. 1). Например, в водном растворе после 5 минут ультразвукового диспергирования уже на первые сутки оптическая плотность падает на 50 %, через 60 суток – 91 %, в отличие от спиртового раствора, где за 24 часа и 60 суток оптическая плотность изменяется лишь на 2,1 и 34 % соответственно.

В связи с этим возникает вопрос о влиянии растворителя на коллоидную устойчивость окисленных нанографитов. Для этого проведено моделирование взаимодействия частиц оксида нанографита с молекулами растворителя в программном комплексе МОРАС. В качестве частиц оксида нанографита приняты молекулярные системы, представленные на рис. 3, а, с относительным содержанием С : О, равным 79,5 : 20,5, и числом слоев, равным двум (см. рис. 3, б). Кислородсодержащие части молекулы представлены гидроксильной и карбоксильной группами. Влияние растворителя учитывалось через континуальную модель COSMO с одиночной молекулой растворителя в пространстве между молекулами оксида нанографита.

Таблица 1

Изменение оптической плотности суспензии оксида графеновых структур

Растворитель	μ	УЗ, мин	Оптическая плотность							
			Интервал измерений, сутки							
			0	1	2	3	4	10	30	60
Вода	1,86	5	0,620	0,300	0,250	0,180	0,110	0,082	0,070	0,061
		30	0,623	0,450	0,380	0,340	0,310	0,305	0,302	0,302
		60	0,620	0,580	0,560	0,540	0,500	0,450	0,370	0,320
Этанол	1,66	5	0,620	0,610	0,599	0,580	0,580	0,550	0,510	0,450
		30	0,625	0,605	0,602	0,601	0,599	0,599	0,599	0,599
		60	0,620	0,620	0,610	0,610	0,610	0,610	0,610	0,605

Коллоидная устойчивость суспензий оксида nanoграфита описывалась из соображений прочности связи двух листов окисленного nanoграфита через молекулу растворителя, с учетом того, что чем сильнее энергия связи между ними, тем частицы более склонны к коагуляции в данном растворителе. Структуры оксид nanoграфита – растворитель – оксид nanoграфита приведены на рис. 4. При этом для воды в качестве прослойки между молекулами оксида nanoграфита принято девять молекул, для этанола – пять.

Для комплексов без учета растворителя и с учетом этанола только через континуальную модель наблюдалась окислительно-восстановительная реакция на одном из контактирующих листов оксида nanoграфита с восстановлением π -системы и выделением углекислого газа и воды:



которые оставались между контактирующими листами (рис. 5).

В таблицах 2 и 3 приведены значения энтальпий образования исследуемых молекул и комплексов. В таблице 3 выделены значения энергии, наиболее близко соответствующие коагуляции частиц оксида nanoграфита в вакууме, воде и этаноле.

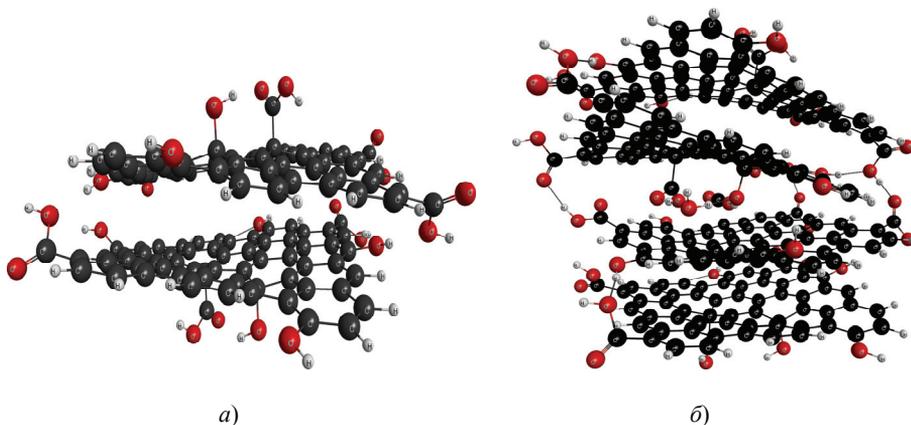


Рис. 3. Модель частиц оксида nanoграфита (а) и бимолекулярный комплекс оксида nanoграфита в вакууме (б) (оптимизировано методом PM7)

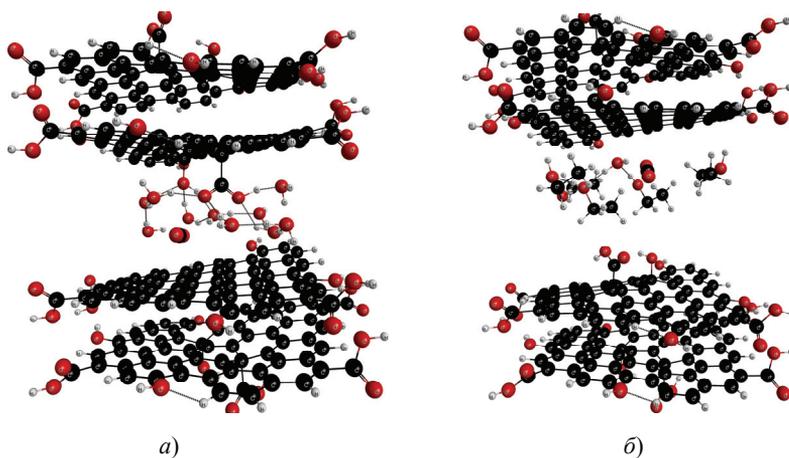


Рис. 4. Бимолекулярный комплекс оксида nanoграфита через прослойку растворителя: а – вода; б – этанол (оптимизировано методом PM7/COSMO)

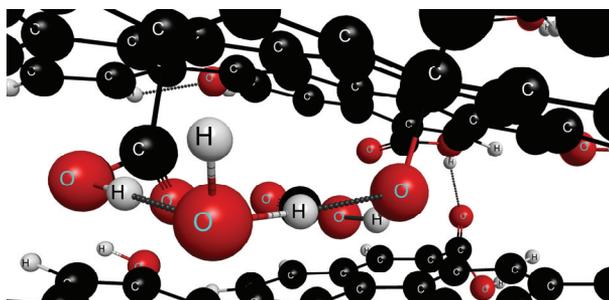


Рис. 5. Иллюстрация окислительно-восстановительного процесса между листами оксида графита

Таблица 2

Энтальпии образования исследуемых молекул и комплексов

Комплекс	ΔH_{298} , кДж/моль		
	Вакуум	COSMO	
		H ₂ O	C ₂ H ₅ OH
H ₂ O	-241,84	-272,85	-271,39
C ₂ H ₅ OH	-242,08	–	-264,68
GO	-2674,90	-3011,22	-2992,51
2 GO	-6076,65	-6177,78	-6357,98
2 GO + H ₂ O	-8547,93	-9180,82	–
2 GO + C ₂ H ₅ OH	-7303,77	–	-7804,08

Таблица 3

Энтальпии образования молекулярных комплексов оксид графита – растворитель – оксид графита и оксид графита – оксид графита из отдельных молекул

Комплекс	ΔH_{298} , кДж/моль		
	Вакуум	COSMO	
		H ₂ O	C ₂ H ₅ OH
2 GO → GO—GO	-726,85	-155,34	-372,96
2 GO + H ₂ O → GO—H ₂ O—GO	-1021,57	-702,73	–
2 GO + C ₂ H ₅ OH → GO—C ₂ H ₅ OH—GO	-743,57	–	-495,66

Данная энергия соответствует площади слипания примерно $13 \times 13 \text{ \AA}^2$ и молекулярной массе 3832 а.е. Переходя к массовым характеристикам, для коагуляции в этаноле будем иметь 129,35 кДж/кг. Учитывая тот факт, что в данной модели существенное влияние оказывают концевые кислородсодержащие группы, чье влияние будет уменьшаться по мере роста листа, и то, что площадь контакта невелика по сравнению с общей свободной поверхностью (из-за стерических затруднений, см. рис. 2 – 5), реальная удельная энергия на одну частицу или на 1 г оксида графита будет ниже.

Список литературы

1. Mathematical Modeling of Alkyde Resin Paint Modified by Carbon Nanotubes / A. Rukhov [et al.] // *Journal of Physics Conference Series*. – 2018. – No. 1084 – 6 p. doi :10.1088/1742-6596/1084/1/012003
2. Дисперсия графеновых наноструктур для эффективной сорбции ионов Pb(II) из водных растворов / А. Е. Кучерова [и др.] // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 439 – 444. doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.439-444
3. Hummers, W. S. Preparation of Graphitic Oxide / W. S. Hummers, R. E. Offeman // *Journal of the American Chemical Society*. – 1958. – Vol. 80, No. 6. – P. 1339 – 1339.
4. Бакунин, Е. С. Современные способы получения малослойных графеновых структур методом электрохимической эксфолиации графита // Е. С. Бакунин, Е. Ю. Образцова, А. В. Рухов // *Перспективные материалы*. – 2018. – № 7. – С. 5 – 15. doi: 10.30791/1028-978X-2018-7-5-15
5. Fabrication of Uniform Si-Incorporated SnO₂ Nanoparticles on Graphene Sheets as Advanced Anode for Li-Ion Batteries / X. Liang [et al.] // *Applied Surface Science*. – In progress (15 May 2019). – Vol. 476. – P. 28 – 35. doi: 10.1016/j.apsusc.2018.12.288
6. Enhanced Electrochemical Performance at High Temperature of Cobalt Oxide / Reduced Graphene Oxide Nanocomposites and its Application in Lithium-Ion Batteries / Y. Mussa [et al.] // *Scientific Reports*. – 2019. – Vol. 9, No. 44. – P. 76 – 83.
7. Graphene Oxide/Cobalt-Based Nanohybrid Electrodes for Robust Hydrogen Generation / F. Navarro-Pardo [et al.] // *Applied Catalysis B: Environmental*. – In progress (15 May 2019). – Vol. 245. – P. 167 – 176. doi: 10.1016/j.apcatb.2018.12.041

Physical and Chemical of Properties Colloidal Stability in Polar Solvents of Nanographite Oxide Synthesized by Electrochemical Method

E. Yu. Obratsova, A. A. Degtyarev, A. V. Rukhov, E. S. Bakunin

*Department of Chemistry and Chemical Technology, TSTU,
Tambov, Russia; niki83@mail.ru*

Keywords: nanographite oxide; solvents; ethyl alcohol; colloidal stability.

Abstract: This paper presents the conditions for obtaining oxidized nanographite by the method of electrochemical exfoliation from “Graflex” graphite foil on the direct current in a two-electrode cell in the solution of sulfuric acid. Experimental and theoretical methods were used to study the colloidal stability of this material in polar solvents, such as water and ethanol without adding surfactants that prevent particle agglomeration. It was found that the stability in ethanol of nanographite oxide was higher than that in water. Theoretical calculations of computational chemistry were used to explain the experimental fact.

References

1. Rukhov A., Tugolukov E, Juboori S., Brankin K. Mathematical Modeling of Alkyde Resin Paint Modified by Carbon Nanotubes, *Journal of Physics Conference Series*, 2018, no. 1084, 6 p., doi :10.1088/1742-6596/1084/1/012003
2. Kucheroва А.Е., Герасимов А.В., Бураков А.Е., Романцова И.В., Мележик А.В. [Dispersion of graphene nanostructures for effective sorption of Pb(II) ions from Water Solutions], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 439-444, doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.439-444 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Hummers W.S., Offeman R.E. Preparation of Graphitic Oxide, *Journal of the American Chemical Society*, 1958, vol. 80, no. 6, pp. 1339-1339.

4. Bakunin Ye.S., Obratsova Ye.Yu., Rukhov A.V. [Modern methods of obtaining multilayer graphene structures by the method of electrochemical exfoliation of graphite], *Perspektivnyye materialy* [Perspective materials], 2018, no. 7, pp. 5-15. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Liang X., Wang J., Zhang S., Wang L., Wang W., Li L., Wang H., Huang D., Zhou W., Guo J. Fabrication of Uniform Si-Incorporated SnO₂ Nanoparticles on Graphene Sheets as Advanced Anode for Li-Ion Batteries, *Applied Surface Science*, in progress (15 May 2019), vol. 476, pp. 28-35, doi: 10.1016/j.apsusc.2018.12.288

6. Mussa Y., Ahmed F., Abuhimad H., Arsalan M., Alsharaeh E. Enhanced Electrochemical Performance at High Temperature of Cobalt Oxide/Reduced Graphene Oxide Nanocomposites and its Application in Lithium-Ion Batteries, *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, no. 44, pp. 76-83, doi: 10.1038/s41598-018-37032-5

7. Navarro-Pardo F., Tong X., Selopal G.S., Cloutier S.G., Sun Sh., Tavares A.C., Zhao H., Wang Zh.M., Rosei F. Graphene Oxide/Cobalt-Based Nanohybrid Electrodes for Robust Hydrogen Generation, *Applied Catalysis B: Environmental*, in progress (15 May 2019), vol. 245, pp. 167-176, doi: 10.1016/j.apcatb.2018.12.041

Physische und chemische Besonderheiten der kolloidalen Stabilität in polaren Lösungsmitteln von durch elektrochemisches Verfahren synthetisiertem Nanographitoxid

Zusammenfassung: Es sind die Bedingungen für die Herstellung von oxidiertem Nanographit durch elektrochemische Exfoliation aus Graphitfolie der Marke "Graf-Lex" in einer Zwei-Elektroden-Zelle mit Gleichstrom in der Lösung von Schwefelsäure vorgestellt. Mit Hilfe der experimentellen und theoretischen Methoden ist die kolloidale Stabilität dieses Materials in polaren Lösungsmitteln wie Wasser und Ethylalkohol ohne Zugabe von Tensiden untersucht, die die Agglomeration von Partikeln hemmen. Es ist gezeigt, dass die Stabilität von Nanographitoxid in Ethanol höher als im Wasser ist. Mit Hilfe theoretischer Berechnungen der Computerchemie ist die experimentelle Tatsache erklärt.

Particularités physiques et chimiques de la stabilité colloïdale dans les solvants polaires de l'oxyde de nanographite, synthétisé de façon électrochimique

Résumé: Sont présentées les conditions d'obtention d'un nanographite oxydé par exfoliation électrochimique à partir d'une feuille de graphite de la marque "Comte-Lex" à courant continu dans une cellule à deux électrodes dans une solution d'acide sulfurique. Par les méthodes expérimentales et théoriques est étudiée la stabilité colloïdale de ce matériau dans des solvants polaires tels que l'eau et l'alcool éthylique sans ajouter de tensioactifs qui empêchent l'agglomération des particules. Est montré que la résistance à l'éthanol de l'oxyde de nanographite est plus haute que celle dans l'eau. Les calculs théoriques de la chimie de calcul expliquent le fait expérimental.

Авторы: *Образцова Елена Юрьевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия и химические технологии»; *Дегтярев Андрей Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия и химические технологии»; *Рухов Артём Викторович* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Химия и химические технологии»; *Бакунин Евгений Сергеевич* – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Химия и химические технологии», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

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

ПОСТРОЕНИЕ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ЦЕПЕЙ СТАНКОВ СО СЛОЖНЫМИ ДВИЖЕНИЯМИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИНХРОННЫХ СВЯЗЕЙ

В. А. Ванин, А. Н. Колодин, А. А. Родина, В. Х. Фидаров

*Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; kafedra@mail.gaps.tstu.ru*

Ключевые слова: внутренние формообразующие связи; генератор гидравлических импульсов; гидравлические связи; гидравлический шаговый двигатель; гидравлический шаговый привод; металлорежущие станки.

Аннотация: Рассмотрена возможность построения внутренних (формообразующих) цепей металлорежущих станков различного технологического назначения в виде гидравлической синхронной связи на основе шагового гидропривода в целях применения агрегатно-модульного принципа для повышения точности, снижения металлоемкости, создания рациональной конструкции цепей станка.

Введение

При создании новой модели металлорежущего станка или модернизации существующей актуальной становится задача проектирования и построения внутренних (формообразующих) цепей станков, представляющих собой компонент общей структуры станка, рациональных по функциональной точности, многозвенности, металлоемкости.

Структура кинематических цепей в значительной степени определяет конструктивную сложность станка, методы его настройки, оказывает существенное влияние на точность (геометрическую и кинематическую) и жесткость станка, особенно в станках с точными кинематическими цепями для осуществления точных взаимосвязанных формообразующих и координатных перемещений, когда необходимо создать жесткую кинематическую связь между заготовкой и инструментом.

Одним из основных показателей качества металлорежущих станков является точность, которая представляет собой результат следующих факторов:

- правильного выбора общей компоновки станка и конструкции его отдельных узлов, в особенности структурных внутренних (формообразующих) цепей;
- высокой точности изготовления и сборки станка;
- жесткости технологической системы.

Сложной задачей для металлорежущих станков является обеспечение кинематической точности, которая имеет первостепенное значение для станков со сложными движениями формообразования, таких как зубо- и резьбообрабатывающих, токарно-затыловочных, токарно-винторезных.

Известные традиционные методы построения внутренних (формообразующих) цепей металлорежущих станков на основе механических связей для повышения их точности, которые сводятся к увеличению жесткости систем станков, выбору рациональной конструкции базовых деталей, повышению качества сборки и доводки узлов, достигли определенного предельного уровня влияния на точность станков и практически не имеют резервов повышения точности.

Дальнейшие работы в данном направлении приводят к существенному повышению стоимости станка. Особенно это актуально для станков, имеющих сложные разветвленные многозвенные переналаживаемые механические цепи значительной протяженности, которые должны обеспечить жесткую функциональную связь для создания точных взаимосвязанных формообразующих движений заготовки и инструмента. К таким цепям относятся: винторезные в резьбообрабатывающих станках; затылования (деления) в токарно-затыловочных станках; обката и деления в зубообрабатывающих станках для обработки зубьев конических и цилиндрических зубчатых колес; цепи подачи различного назначения – вертикальная, тангенциальная, радиальная, диагональная – в зубофрезерных станках и т.д.

Для осуществления в станке требующегося необходимого исполнительного формообразующего движения между заготовкой и инструментом необходимо создать кинематическую связь между исполнительными звеньями станка и кинематическую связь этих звеньев с источником движения. Данные связи осуществляются в основном с помощью механических элементов как в цепях главного движения, так и во внутренних (формообразующих) цепях станков.

Характеристика формообразующих цепей металлорежущих станков, составленных из механических звеньев

Кинематические внутренние (формообразующие) цепи с механическими звеньями обеспечивают точное передаточное отношение выходных звеньев – заготовки и инструмента и не требуют дополнительных поднастроек в процессе работы.

На кинематическую точность внутренних цепей, составленных из механических звеньев (валов, зубчатых и иных передач, муфт и т.д.), влияют геометрическая неточность элементов и неточность их взаимного расположения, обусловленная погрешностями обработки и сборки.

Существенное влияние на точность цепи оказывают температурные деформации и крутильная жесткость, которая определяется взаимным углом поворота валов конечных звеньев кинематических цепей в зависимости от приложенного крутящего момента, жесткостью и числом стыков кинематических пар.

Большое значение приобретает влияние крутильной жесткости в винторезных цепях; цепях деления и обката значительной протяженности, при этом цепи не всегда обеспечивают необходимую кинематическую точность, так как повышенное трение, изнашивание приводят к постоянному снижению точности кинематических цепей. Под действием усилий резания, переменных сил трения и инерционных нагрузок валы с закрепленными зубчатыми колесами, шкивами деформируются, что создает дополнительные динамические нагрузки в цепях, а валы с закрепленными шестернями испытывают крутильные и поперечные колебания.

Работая в тяжелых динамических условиях и передавая конечным звеньям цепи – заготовке и инструменту – большие усилия, элементы кинематических цепей изнашиваются, и первоначальная точность станка теряется.

Кроме того, сложное пространственное расположение элементов кинематических механических цепей между подвижными исполнительными органами (уз-

лами заготовки и инструмента) станков предъявляет жесткие требования к размещению исполнительных механизмов станков (гитар сменных колес для настройки цепей делительных, обкатки, дифференциала, корректирующих устройств и т.д.) показателям кинематической точности, жесткости, металлоемкости.

Одним из возможных, практически реализуемых, решений повышения точности внутренних (формообразующих) цепей металлорежущих станков и сохранения ее в процессе эксплуатации является сокращение протяженности кинематических цепей и применение гидравлических связей в виде высокоточного дискретного шагового гидравлического привода [2, 3].

Оценка гидравлических формообразующих связей на основе шагового гидропривода в металлорежущих станках

Основной целью построения внутренних (формообразующих) цепей металлорежущих станков различного технологического назначения на основе шагового гидропривода в виде гидравлических связей является устранение неоправданного многообразия конструктивного и компоновочного исполнения внутренних кинематических цепей, выполняющих однотипные функции, и приведение их к возможному единообразию.

Гидравлический шаговый привод составляет новый класс объемных гидроприводов, характерной особенностью которых является то, что в качестве силового исполнительного органа в них используется специальный гидравлический шаговый двигатель (ГШД), выходной вал которого устойчиво обрабатывает управляющие дискретные сигналы с высокой точностью и большим усилением по мощности при значительных нагрузках. Структурно шаговый гидропривод представляет собой систему, состоящую из трех функционально и конструктивно завершенных агрегатов (модулей): источника рабочей жидкости (насосной установки); управляющего (коммутлирующего) устройства (генератора гидравлических импульсов) и исполнительного силового ГШД [3, 4].

Поскольку для воспроизведения образующей линии по методу обката между перемещениями рабочих органов – узлов заготовки и инструмента – необходимо обеспечить требуемую функциональную зависимость, а для получения формообразующего движения осуществить жесткую кинематическую связь между заготовкой и инструментом, то из всех разновидностей шаговых гидродвигателей наиболее приемлемыми являются двигатели с механической редукицией шага.

Внутренние кинематические цепи металлорежущих станков, выполненные в виде гидравлических связей на основе шагового гидропривода, возможно построить, используя агрегатно-модульный принцип [4 – 8], благодаря тому, что все составные агрегаты шагового гидропривода – источник рабочей жидкости (насосная установка), исполнительный силовой орган (ГШД с механической редукицией шага), управляющее устройство (генератор гидравлических импульсов (ГГИ)) – выполнены в виде конструктивно и функционально завершенных блоков (модулей), которые имеют типовые присоединительные размеры и стыковочные устройства. Это обеспечивает возможности соединения с конечными звеньями кинематических цепей и выполнения заданных функций либо самостоятельно, либо совместно с другими блоками в зависимости от сложности, назначения, точности кинематической цепи, числа формообразующих движений, что позволяет осуществить кинематическую связь для станков различных типоразмеров и технологического назначения.

Передаточные отношения внутренней (формообразующей) цепи, выполненной в виде гидравлической связи на основе шагового гидропривода, связывающие в определенной зависимости движения заготовки и инструмента, зависят от соот-

ношения частот гидравлических импульсов, подаваемых к ГШД, осуществляющих согласованное движение заготовки и инструмента.

Используя свойства частотного регулирования скорости исполнительных шаговых гидродвигателей, возможно применить гидравлические связи на основе шагового гидропривода для построения внутренних (формообразующих) цепей станков взамен механических, которые обеспечивают жесткую функциональную связь для создания взаимосвязанных формообразующих движений заготовки и инструмента.

Использование дискретного шагового гидропривода для построения внутренних кинематических цепей станков позволяет существенно упростить систему управления, получить достаточную точность при разомкнутой системе управления благодаря однозначному соответствию между числом и частотой следования управляющих импульсов и величиной и скоростью обработки дискретных перемещений (угловых или линейных) на выходе исполнительного органа.

Используя свойства частотного регулирования скорости исполнительных органов шагового гидропривода, представляется возможным гидравлические связи на основе шагового гидропривода применить для построения внутренних (формообразующих) цепей, требующих точного взаимосвязанного формообразующего движения заготовки и инструмента. Благодаря использованию гидравлической связи, кинематика и компоновка станка существенно упрощаются, металлоемкость и масса станка уменьшаются, точность обработки становится мало зависимой от изменения режимов резания и условий эксплуатации. Накопленная погрешность изделия не зависит от расстояния между заготовкой и инструментом и будет определяться точностью изготовления конечных делительных передач станка и точностью изготовления силовых шаговых гидродвигателей, а общая протяженность кинематической цепи между инструментом и изделием будет значительно сокращаться.

Рассмотрим структурные схемы металлорежущих станков различного технологического назначения, формообразующие кинематические цепи которых построены в виде гидравлических связей на основе гидропривода с различными схемами коммутации рабочей жидкости.

Реализация построения гидравлических внутренних (формообразующих) цепей металлорежущих станков на основе шагового гидропривода

На рисунке 1 приведена структурная схема токарно-затыловочного станка с гидравлическими формообразующими связями для затылования червячных модульных фрез с винторезными стружечными канавками с модифицированной системой управления.

Станок включает в себя заготовку 11, совершающую вращательное движение от электродвигателя Д через звено настройки i_v , инструмент 12, взаимодействующий с заготовкой по цепи затылования (деления).

Движение затылования (деления), связывающее между собой вращение заготовки 11 и вращение кулачка затылования 7, от которого получает возвратно-поступательное движение верхняя каретка 13 с инструментом 12, осуществляется от шагового гидродвигателя 3 через суммирующий механизм 2 в виде дифференциала с коническими колесами, кинематически связанного с кулачком затылования 7. Управление шаговым гидродвигателем осуществляется генератором гидравлических импульсов 9, золотниковая втулка которого получает вращение от зубчатого колеса 10, жестко закрепленного на шпинделе изделия.

Продольное перемещение продольного суппорта 8 с инструментом 12 связано с вращением заготовки 11 винторезной цепью и осуществляется от шагового гидродвигателя 15, кинематически соединенного посредством ходового винта 17

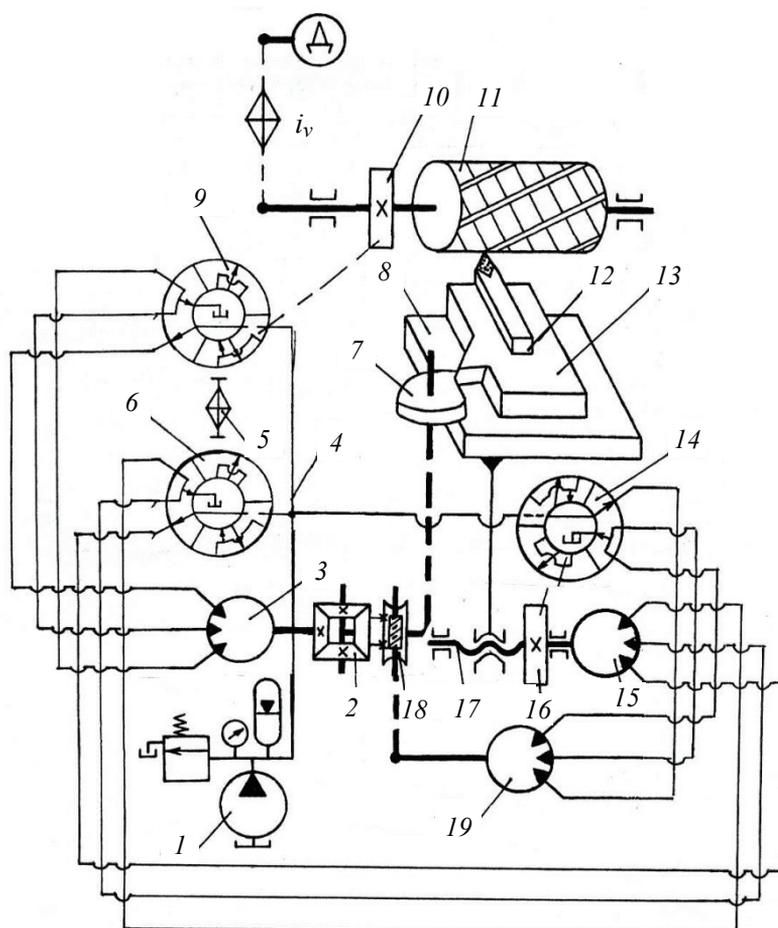


Рис. 1. Структурная схема токарно-затыловочного станка с гидравлическими формообразующими связями для затылования червячных модульных фрез с винторезными стружечными канавками с модифицированной системой управления

с продольным суппортом 8 и управляемого генератором гидравлических импульсов 14, который получает вращение от генератора гидравлических импульсов 9 цепи затылования (деления) через гитару сменных зубчатых колес.

Дифференциальное движение, необходимое при затыловании червячных изделий с винтовыми стружечными канавками и обеспечивающее дополнительный поворот кулачку затылования 7, от которого совершается радиальное возвратно-поступательное движение инструмента при продольном перемещении продольного суппорта 8, осуществляется шаговым гидродвигателем 15, кинематически связанным с кулачком затылования через суммирующий механизм 2 в виде дифференциала с коническими колесами посредством червячной передачи 18 и управляемого генератора гидравлических импульсов 14, который получает вращение от приводного зубчатого колеса 16, жестко закрепленного на ходовом винте 17 продольной подачи суппорта 8. Рабочая жидкость подводится к генераторам гидравлических импульсов от насосной установки 1 по трубопроводу 4.

На рисунке 2 представлена структурная схема копировально-фрезерного станка с гидравлическими формообразующими связями для обработки деталей со сложными поверхностями, типа дисковых кулачков с модифицированной системой управления [7].

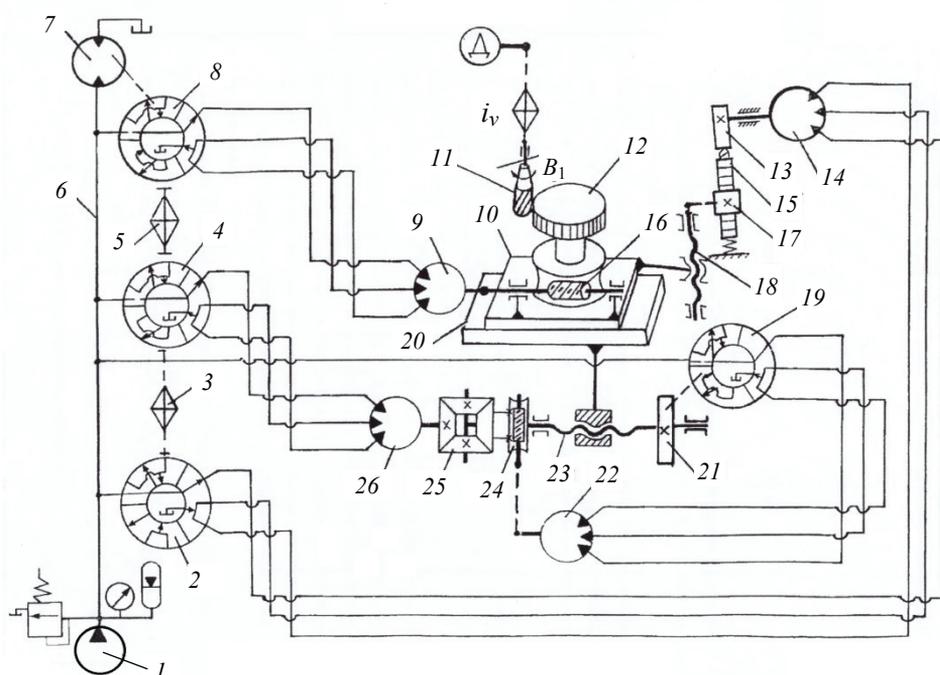


Рис. 2. Структурная схема копировально-фрезерного станка с гидравлическими формообразующими связями для обработки деталей со сложными поверхностями, типа дисковых кулачков с модифицированной системой управления

Станок включает в себя инструмент *11*, совершающий вращательное движение от электродвигателя Д через звено настройки *12*, которая получает вращение от шагового гидродвигателя *9*, связанного посредством червячной передачи *16* с круглым столом с заготовкой и управляемого ГЦИ *8*, золотниковая втулка получает вращение от гидромотора *7*.

Сложное формообразующее движение, составленное из элементарных прямолинейных перемещений между продольным перемещением продольного стола *20* и поперечным перемещением верхних салазок *10* с круглым столом с заготовкой *12*, осуществляется гидравлическими внутренними (формообразующими) связями, выполняемыми на основе шагового гидропривода.

Продольное перемещение стола *20* осуществляется от шагового гидродвигателя *26*, кинематически связанного с ним посредством ходового винта *23* через суммирующий механизм *25*, выполненный в виде дифференциала с коническими зубчатыми колесами.

Поперечное перемещение верхних салазок *10* с круглым столом необходимо для воспроизведения требуемой фасонной поверхности кулачка. Перемещение обеспечивается внутренней (формообразующей) связью между продольным столом *20* и верхними салазками *10* и осуществляется от шагового гидродвигателя *14*, на выходном валу которого закреплен сменный копир *13*, преобразующий равномерное дискретное вращение шагового гидродвигателя *14* в неравномерное перемещение верхних салазок *10* посредством зубчатой рейки *15*, зубчатого реечного колеса *17*, жестко закрепленного на ходовом винте *18* поперечной подачи верхних салазок *10*.

Управление ГШД *14* привода поперечной подачи верхних салазок *10* осуществляется ГЦИ *2*, золотниковая втулка которого получает вращение через несилую гитару сменных зубчатых колес *3* от вращающейся золотниковой втулки ГЦИ *4* привода продольного перемещения продольного стола *20*.

Управление ГШД 9 привода вращения круглого стола с заготовкой 12 осуществляется ГГИ 8, золотниковая втулка которого получает вращение через несилую гитару сменных зубчатых колес 5 от вращающейся золотниковой втулки ГГИ 4 привода продольного перемещения продольного стола 20.

Для осуществления круглым столом с заготовкой сложного движения формообразования, вызванного тем, что движение обката составлено из разнородных движений – поступательного перемещения продольного стола 20 и вращательного движения круглого стола и, учитывая, что стол 20 является общим исполнительным звеном, одновременно входящим в группы деления и обката, соединение групп осуществляется с помощью суммирующего механизма 25.

Дополнительное движение сообщается от ГШД 22, кинематически связанного с ходовым винтом 23 продольной подачи стола 20 через червячную передачу 24 и управляемый ГГИ 19, золотниковая втулка которого приводится во вращение от приводного зубчатого колеса 21, жестко закрепленного на ходовом винте 23 продольного перемещения продольного стола 20. Рабочая жидкость к генераторам гидравлических импульсов подается от насосной установки 1 по трубопроводу 6.

На рисунке 3 представлена структурная схема зуборезного станка с гидравлическими формообразующими связями для нарезания зубьев конических зубчатых колес со спиральным зубом резьбовой головкой [9] с системой управления от блоков гидрораспределителей, построенной на базе двухкромочного золотника с торцевым распределением рабочей жидкости [10].

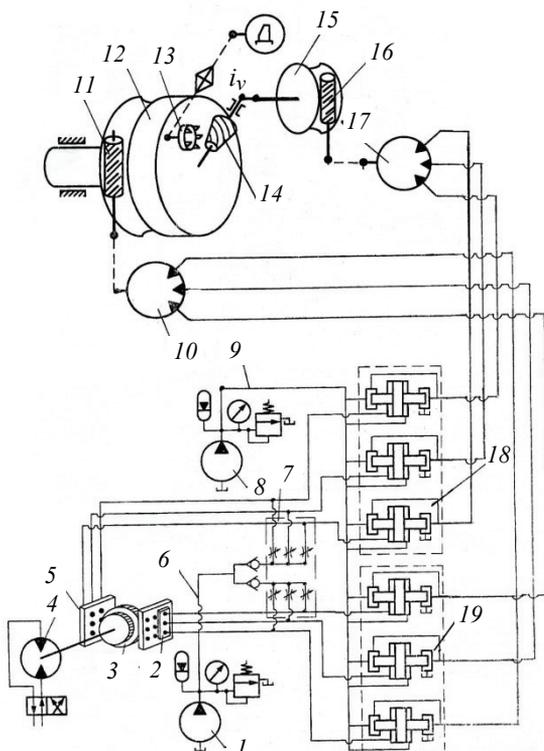


Рис. 3. Структурная схема зуборезного станка с гидравлическими формообразующими связями для нарезания зубьев конических зубчатых колес со спиральным зубом резьбовой головкой с системой управления от блоков гидрораспределителей, построенной на базе двухкромочного золотника с торцевым распределением рабочей жидкости

Станок включает в себя инструмент (резьбовая головка) 13, который размещается на люльке 12 и получает вращение от электродвигателя Д через звено на-стройкой i_v и заготовку 14, связанную с люлькой 12 гидравлической цепью обката.

Вращение люльки 12 с инструментом 13 осуществляется от шагового гидро-двигателя 10, кинематически связанного посредством червячной передачи 11 с люлькой. Вращение заготовки 14 производится шаговым гидродвигателем 17, кинематически связанным с бабкой изделия посредством червячной передачи 16.

Управление шаговыми гидродвигателями 10 и 17 приводов вращения обкат-ной люльки 12 с инструментом 13 и заготовки 14 осуществляется от блоков тор-цевых гидрораспределителей 18 и 19, которые состоят их трех одинаковых по числу силовых каналов гидравлических распределителей на базе двухкромоч-ного золотника.

Настройка гидравлической внутренней формообразующей цепи на требуе-мое передаточное отношение производится с помощью генератора гидравличе-ских импульсов 3, который представляет собой набор кодирующих дисков, закреп-ленных на общей оси и получающих вращение от отдельного гидромотора 4. Число таких кодирующих дисков в генераторе определяет общее число передат-очных отношений гидравлической внутренней (формообразующей) цепи. Генера-тор гидравлических импульсов формирует гидравлические импульсы давления и распределяет их по рабочим камерам шаговых гидродвигателей, периодически в определенной последовательности открывая и закрывая рабочие щели.

Наружная поверхность каждого из кодирующих дисков выполнена таким об-разом, что его выступы при вращении дисков либо перекрывают сопло, либо оста-вляют его свободным, причем один выступ может перекрывать только одну щель, то есть при скважности между выступом и впадиной кодирующего диска должно выполняться соотношение $1/(n-1)$, при этом щели располагаются в кор-пусе генератора импульсов с шагом

$$t_{щ} = t_B \left(m \pm \frac{1}{n} \right),$$

где t_B – шаг выступов кодирующего диска $t_B = \frac{360}{z}$, z – число выступов коди-рующего диска; m – целое число, выбирающееся из условия удобного расположе-ния и подсоединения рабочих щелей к гидролиниям; n – число щелей, соответст-вующее числу каналов ГШД.

При таком расположении рабочих щелей относительно выступов вращающе-гося кодирующегося диска через две оставшиеся непокрытыми щели рабочая жидкость подступает на слив, а одна из щелей постоянно перекрывается высту-пом диска.

В момент, когда выступ вращающегося диска ГГИ находится напротив рабо-чей щели, происходит скачкообразное повышение управляющего давления, в ре-зультате чего осуществляется переключение гидрораспределителя. В момент, ко-гда управляющее давление в одном из каналов увеличивается до максимального, в других, оставшихся не перекрытыми, рабочая жидкость поступает на слив. При отсутствии управляющего сигнала (импульса давления) распределитель находит-ся в левом положении под действием давления питания и усилия пружины с пра-вого торца распределителя.

При достижении управляющим давлением значения, соответствующего точ-ке срабатывания, распределитель начнет перемещаться из своего крайнего левого положения, причем, при срабатывании распределителя давления действует на всю площадь малого торца и перебрасывает распределитель вправо. Левый торец от-крывает напорное сопло, а правый – закрывает слив. При указанном расположе-нии щелей относительно выступов через две оставшиеся незакрытыми щели ра-

бочая жидкость идет на слив, а одна щель всегда перекрывается выступом. В момент, когда выступ вращающегося диска генератора импульсов устанавливается против щели, происходит повышение управляющего давления и, в результате, переключение распределителя в правое положение. В то время, как управляющее давление одного из каналов увеличивается до максимального, в двух других весь расход идет на слив.

Давление питания на вход каждого из гидрораспределителей подается через регулируемый дроссель блока дросселей 7 от насосной установки 1, а затем, в зависимости от положения торцовых гидрораспределителей, по одному из каналов направляется к гидравлическим шаговым двигателям 10 и 17 приводов заготовки и инструмента. Генератор гидравлических импульсов обеспечивает постоянное для данной настройки отношение частот гидравлических импульсов давления, а, следовательно, и частот вращения выходных валов ГШД приводов заготовки и инструмента. Коммутация потоков рабочей жидкости по силовым каналам и рабочим камерам шаговых гидродвигателей зависит от того, какая щель управляющих каналов перекрыта в данный момент выступом вращающегося кодирующего диска ГГИ.

Передаточное отношение между исполнительными органами гидравлической связи во внутренней цепи шаговых гидродвигателей 10 и 17 приводов заготовки и инструмента зависит от соотношения частот гидравлических импульсов.

Изменение величины передаточного отношения гидравлической цепи обката (деления) производится перемещением ползушек 2 на корпус ГГИ относительно периферии кодирующих дисков с различным числом выступов. При этом осуществляется коммутация потоков рабочей жидкости по силовым каналам шаговых гидродвигателей в зависимости от того, какая щель из управляющих каналов перекрыта в данный момент времени выступом вращающегося кодирующегося диска ГГИ.

Рабочая жидкость от силовой насосной станции 8 поступает на вход блоков дискретных гидрораспределителей 18 и 19, а затем, в зависимости от положения распределителей, по одному из силовых каналов подается в рабочие камеры шаговых гидродвигателей 10 и 17 приводов заготовки и инструмента.

На рисунке 4 приведена схема резбифрезерного станка с гидравлическими формообразующими связями для нарезания цилиндрических винтовых поверхностей переменного шага [8] с модифицированным механизмом приращения шага.

Станок включает в себя инструмент 8, представляющий собой дисковую фрезу с профилем, соответствующим профилю нарезаемой винтовой поверхности, и совершающий вращательное движение от электродвигателя Д1 через звено настройки i_{v1} и заготовку, которая делает вращение (движение круговой подачи) от электродвигателя Д через звено настройки i_v .

Резбифрезерный станок включает в себя следующие кинематические цепи: вращения инструмента (дисковой фрезы); вращения шпинделя с заготовкой (движение круговой подачи); начального шага, связывающую между собой вращение шпинделя с заготовкой и продольное перемещение суппорта с фрезерной головкой от ходового винта продольной подачи; приращения шага винтовой поверхности, связывающую цепь начального шага и суммирующий механизм, задающий закон изменения шага, выполненный в виде коррекционной линейки в комбинации с червячной передачей.

Продольное перемещение суппорта 2 с фрезерной головкой 9, несущей инструмент 8 (цепь начального шага винтовой поверхности) осуществляется от шагового гидродвигателя 1, управляемого генератором гидравлических импульсов 3, золотниковая втулка которого получает вращение от приводного зубчатого колеса 5, жестко закрепленного на шпинделе заготовки 7.

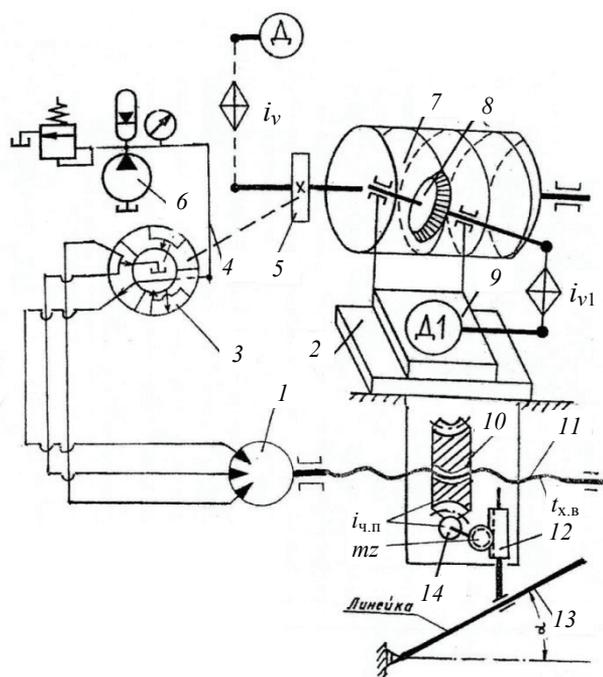


Рис. 4. Структурная схема станка резьбофрезерного с гидравлическими формообразующими связями для нарезания цилиндрических винтовых поверхностей переменного шага с модифицированным механизмом приращения шага

Дополнительное перемещение продольного суппорта с инструментом, необходимое для получения величины приращения шага винтовой поверхности при продольном перемещении суппорта, осуществляется от коррекционной линейки 13, установленной под углом к линии центра станка.

При продольном перемещении продольного суппорта 2 с фрезерной головкой 9 одновременно будет перемещаться в поперечном направлении к линии центров станка зубчатая рейка 12, шарнирно связанная с установленной под углом коррекционной линейкой 13, и поворачивать реечное колесо, кинематически связанное с суммирующим механизмом, выполненным в виде червячной передачи на гайке 10 ходового винта 11.

Рабочая жидкость к генератору гидравлических импульсов поступает от насосной установки 6 по трубопроводу 4.

Заключение

Использование гидравлических связей на основе шагового гидравлического привода делает возможным построение внутренних (формообразующих) цепей металлорежущих станков по модульному принципу, отличительными особенностями которых являются:

– обеспечение конструктивной однородности кинематических связей между конечными звеньями (заготовкой и инструментом) для станков со сложными движениями формообразования, различного технологического назначения и разных типоразмеров;

- обеспечение конструктивной приемственности при создании станков, благодаря типизации конструкций внутренних кинематических цепей на основе гидравлической связи в виде шагового гидропривода;
- уменьшение накопленной погрешности изделия;
- уменьшение металлоемкости и массы станков;
- значительно упрощается кинематическая структура станка за счет исключения до возможного минимума из кинематических цепей всех промежуточных звеньев;
- обеспечение унификации как элементов привода, так и приводов в целом, для станков одного назначения.

Работа подготовлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 17-48-680787.

Список литературы

1. Колодин, А. Н. Затыловочные станки с гидравлическими формообразующими связями : монография / А. Н. Колодин, В. А. Ванин, А. А. Родина // Deutschland : LAP Lambert Academic Publishing, 2015. – 169 с.
2. Ванин, В. А. Станки с гидравлическими внутренними (формообразующими) связями на основе шагового гидропривода для обработки винтовых поверхностей / В. А. Ванин, А. Н. Колодин // Справочник. Инженерный журнал с приложениями. – 2012. – № 7 (184). – С. 30 – 35.
3. Металлорежущие станки с гидравлическими связями на основе шагового гидропривода во внутренних (формообразующих) цепях / В. А. Ванин [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 167 – 176.
4. Применение шагового гидропривода для построения формообразующих цепей металлорежущих станков со сложными движениями формообразования / В. А. Ванин [и др.] // Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2014. – №1 (50). – С. 250 – 259.
5. Ванин, В. А. Резьбообрабатывающие станки с гидравлическими формообразующими связями на основе шагового гидропривода для обработки винтовых поверхностей переменного шага / В. А. Ванин, А. Н. Колодин, А. А. Родина // Вестник машиностроения. – 2014. – № 7. – С. 37 – 45.
6. Ванин, В. А. Кинематическая структура металлорежущих станков со сложными движениями формообразования с внутренними гидравлическими связями / В. А. Ванин, А. Н. Колодин // Технология машиностроения. – 2015. – № 5 (155). – С. 18 – 26.
7. Ванин, В. А. Оптимальное построение структуры внутренних цепей станков на основе гидравлических связей / В. А. Ванин, А. Н. Колодин, Д. А. Харин // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов, 2015. – С. 363 – 368.
8. Vanin, V. A. Modular Design Based on Hydraulic Step Drives for Internal Kinematic Chains in Metal-Cutting Machines / V. A. Vanin, A. N. Kolodin // Russian Engineering Research. – 2010. – No. 30 (12). – P. 1248 – 1251.
9. Vanin, V. A. Application of Hydraulic Step Drives in Metal-Cutting Machine Tools / V. A. Vanin, A. N. Kolodin // Russian Engineering Research. – 2010. – No. 30 (5). – P. 446 – 450.
10. Vanin, V. A. Kinematic Structure of Metal-Cutting Machines with Hydraulic Couplings / V. A. Vanin, A. N. Kolodin, A. A. Rodina // Russian Engineering Research. – 2015. – No. 34 (12). – P. 763 – 768.

Construction of Forming Chains of Machine Tools with Complex Forming Movements Based on Hydraulic Synchronous Connections

V. A. Vanin, A. N. Kolodin, A. A. Rodina, V. Kh. Fidarov

*Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering,
TSTU, Tambov, Russia; kafedra@mail.gaps.tstu.ru*

Keywords: internal formative links; hydraulic pulse generator; hydraulic couplings; hydraulic stepping motor; hydraulic stepper drive; machine tools.

Abstract: The paper explores the possibility of constructing internal (forming) chains of metal-cutting machines of various technological purposes in the form of hydraulic synchronous couplings based on a stepper hydraulic drive in order to use the modular principle to improve accuracy, reduce metal intensity, and create a rational design of machine chains.

References

1. Kolodin A.N., Vanin V.A., Rodina A.A. *Zatylovochnyye stanki s gidravli-cheskimi formoobrazuyushchimi svyazyami* [Plugging Machines with Hydraulic Form-Building Links], Deutschland: LAP Lambert Academic Publishing, 2015, 169 p. (In Russ.)
2. Vanin V.A., Kolodin A.N. [Machines with Hydraulic Internal (Shaping) Connections Based on Stepper Hydraulic Drive for Machining of Helical Surfaces], *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniyami* [Reference book. Engineering journal with attachments], 2012, no. 7 (184), pp. 30-35. (In Russ.)
3. Vanin V.A., Kolodin A.N., Do M.Z., Damap M.M. [Metal-Cutting Machines with Hydraulic Connections on the Basis of a Stepper Hydraulic Drive in Internal (Shaping) Chains], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 167-176. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Vanin V.A., Kolodin A.N., Averin A.S., Khramova N.A. [The use of a Stepper Hydraulic Drive for Constructing Form-Forming Chains of Metal-Cutting Machine Tools with Complex Shape-Forming Movements], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2014, no. 1 (50), pp. 250-259. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Vanin V.A., Kolodin A.N., Rodina A.A. [Cutting Machines with Hydraulic Form-Forming Links Based on Stepper Hydraulic Drive for Machining Variable-Pitch Helical Surfaces], *Vestnik mashinostroyeniya* [Mechanical Engineering Bulletin], 2014, no. 7, pp. 37-45. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Vanin V.A., Kolodin A.N. [Kinematic Structure of Machine Tools with Complex Shaping Movements with Internal Hydraulic Connections], *Tekhnologiya mashinostroyeniya* [Engineering Technology], 2015, no. 5 (155), pp. 18-26. (In Russ.)
7. Vanin V.A., Kolodin A.N., Kharin D.A. *Virtual'noye modelirovaniye, prototipirovaniye i promyshlennyy dizayn: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Virtual Modeling, Prototyping and Industrial Design: Materials International Scientific and Practical Conference], Tambov, 2015, pp. 363-368. (In Russ.)
8. Vanin V.A., Kolodin A.N. Modular Design Based on Hydraulic Step Drives for Internal Kinematic Chains in Metal-Cutting Machines, *Russian Engineering Research*, 2010, no. 30 (12), pp. 1248-1251.
9. Vanin V.A., Kolodin A.N. Application of Hydraulic Step Drives in Metal-Cutting Machine Tools, *Russian Engineering Research*, 2010, no. 30 (5), pp. 446-450.

**Bau von formfertigenden Werkzeugmaschinenketten
mit komplexen Formgebungsbewegungen
auf der Grundlage der hydraulischen Synchronverbindungen**

Zusammenfassung: Es ist die Möglichkeit betrachtet, interne (formfertigende) Ketten von metallzerspanenden Werkzeugmaschinen verschiedener technologischer Verwendungszwecke in Form einer hydraulischen synchronen Verbindung auf der Grundlage eines schritthydraulischen Antriebes zu bauen, um das Baukastenprinzip für Erhöhung der Genauigkeit, Reduzierung der Metallkapazität, Schaffung einer rationalen Konstruktion von Maschinenketten zu verwenden.

**Construction des chaînes de formage de machines avec des mouvements
de formage complexes à la base des liaisons synchrones hydrauliques**

Résumé: Est examinée la possibilité de la construction des chaînes internes (formants) des machines-outils de la découpe des métaux à diverses fins technologiques sous la forme d'une connexion synchrone hydraulique à la base de la commande hydraulique pas à pas afin d'appliquer un principe agrégat-modulaire pour augmenter la précision, réduire la capacité métallique, créer une conception rationnelle des chaînes de la machine.

Авторы: *Ванин Василий Агафонович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Колодин Андрей Николаевич* – старший преподаватель кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Родина Антонина Александровна* – старший преподаватель кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Фидаров Валерий Хазбиевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Мордасов Денис Михайлович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

УДК 543.632.5

DOI: 10.17277/vestnik.2019.01.pp.136-141

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ
ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА
НА ОСНОВЕ СМОЛЫ ЭД-20 И НАНОДИСПЕРСИИ
СОПОЛИМЕРА СТИРОЛА И АКРИЛОВОЙ КИСЛОТЫ**

Д. М. Мордасов¹, П. В. Макеев¹, Д. Л. Полушкин², М. Д. Мордасов¹

*Кафедра «Материалы и технология» (1);
Технологический институт (2), ФГБОУ ВО «ТГТУ»,
г. Тамбов, Россия; mit@mail.nnn.tstu.ru*

Ключевые слова: ИК-спектроскопия; композиционный материал; нанодисперсия; полимер; спектр поглощения; структура; характеристические частоты.

Аннотация: Проведен ИК-спектральный анализ полимерных композиционных материалов на основе эпоксидной смолы и наноразмерной водной дисперсии сополимера стирола и акриловой кислоты. В качестве отвердителя эпоксидной смолы использовался полиэтиленполиаминный состав. На основе анализа спектров поглощения ИК-излучения показано, что в результате взаимодействия эпоксидной смолы с отвердителем формируются поперечные межмолекулярные связи, а в присутствии карбоксильных групп стирол-акрилового сополимера происходит раскрытие эпоксидных колец с образованием вторичных гидроксильных групп и формированием линейной полимерной структуры. Повышение степени линейной полимеризации эпоксидной смолы обуславливает пластичность материала, а наличие реакционно-способных гидроксильных групп – высокую адгезию к различного вида основаниям и способность к образованию химически прочных связей с минеральными наполнителями при использовании полимерного композита в качестве матрицы полимер-минеральных композиционных материалов.

Российский строительный рынок сегодня предлагает широкий спектр смесей и растворов для обустройства защитно-декоративных покрытий строительных конструкций.

Существующий спрос на ремонтные, герметизирующие и другие составы функциональных покрытий для различного вида оснований требует создания материалов, способных эксплуатироваться в широком диапазоне изменения условий окружающей среды, характерном для многих регионов России, обладающих повышенными эксплуатационными свойствами и адгезией к широкому классу конструкционных материалов.

Большинство используемых защитных материалов и покрытий представляет собой сложные композиции, состоящие из наполнителя и связующего. В настоящее время в строительстве широко применяются полимерцементные составы, что связано с их высокой технологичностью, качеством получаемых покрытий и другими преимуществами. Совместное использование в составе таких композитов

минеральных и полимерных материалов позволяет регулировать их физико-химические, физико-механические характеристики, адгезионные и диэлектрические свойства. Введение соответствующего наполнителя способствует также и увеличению специальных характеристик изделия.

Характеристики полимер-минеральных растворов и их долговечность в первую очередь определяются структурой, поэтому важно понимать процессы структурообразования при твердении такой системы и целенаправленно влиять на их протекание.

Несмотря на многочисленные попытки оптимизации рецептур строительно-отделочных композиций и технологий их нанесения, проблема повышения межфазного взаимодействия таких материалов с различного вида основаниями не теряет своей актуальности.

В работе [1] проведены всесторонние исследования композиций, в которых в качестве полимерной добавки использовался раствор в стироле продуктов поликонденсации малеинового и фталевого ангидридов с этиленгликолем. Исследованию свойств полимерцементных композиций на основе эпоксидной смолы посвящены работы [2, 3]. Опыт применения латексов, водорастворимых полимеров, жидких смол и мономеров в качестве добавок в бетоны показан в работе [4].

Анализ современного состояния исследований как в России, так и за рубежом в области применения полимерных добавок в цементных растворах, указывает на актуальность использования эпоксидных связующих, акриловых сополимеров и сополимеров стирола.

Полимер-минеральные композиционные материалы (ПМКМ), в которых в качестве полимерной матрицы выступают эпоксидные смолы известны. Эпоксидные смолы (олигомеры) – низкомолекулярные линейные полимеры, характеризующиеся улучшенными технологическими свойствами. Трехмерную пространственно-сшитую структуру эпоксидных смол формируют путем введения отвердителей, которые обеспечивают образование сетчатой структуры с химическими связями между макромолекулами. Основным недостатком таких материалов определяется свойствами эпоксидной смолы – высокой вязкостью, жесткостью и хрупкостью. Данный недостаток может быть устранен путем модификации эпоксидных олигомеров различного рода полимерными добавками, которые улучшают ее технологические и эксплуатационные свойства, снижают расход олигомера. Традиционно используемые для этих целей алифатические эпоксидные смолы и циклокарбонаты решают проблему, однако, применение композиций на их основе в качестве строительно-отделочных материалов, позволяющих эффективно защищать различные конструкционные стеновые материалы от воздействий окружающей среды, ограничено низкими значениями их паропроницаемости и невысокой пигментоемкостью.

Решение заявленной проблемы возможно на основе комплексного подхода, включающего подготовку и исследование взаимодействий отдельных компонентов (полимерных и минеральных) с последующим изучением их взаимного влияния [5 – 7] и разработкой состава и технологии изготовления ПМКМ.

В настоящей работе в целях разработки и оптимизации состава полимерного композита для его применения в качестве матрицы ПМКМ изучены процессы, происходящие при взаимодействии наноразмерной водной дисперсии сополимера стирола и акриловой кислоты с эпоксидным олигомером ЭД-20 и полиэтиленполиаминным отвердителем. Основные требования, предъявляемые к полимерной матрице ПМКМ – высокая адгезия к различного вида основаниям, пластичность, способность к образованию химически прочных связей с минеральными наполнителями.

Для исследования физико-химических процессов при сшивании молекул композита проводили спектральный анализ на ИК Фурье-спектрометре VERTEX 70.

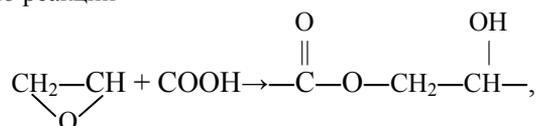
При взаимодействии ИК-потока с анализируемым веществом происходит поглощение излучения определенных частот, называемых характеристическими.

Поглощение излучения характеристической частоты обусловлено присутствием в молекуле определенных функциональных групп. Анализ полученных ИК-спектров полимерных композитов заключался в определении положений максимумов характеристических полос, их интенсивности и формы.

На рисунке 1 представлены ИК-спектры исходных компонентов (ЭД-20, дисперсия частиц сополимера стирола и акриловой кислоты) и полимерных композитов на их основе (15 масс. % ЭД-20 (кривая 1) и 4 масс. % ЭД-20 (кривая 2)).

В инфракрасном спектре отвержденной смолы ЭД-20 (отвердитель ПЭПА) идентифицированы характеристические пики деформационных колебаний связей эпоксидной группы $-\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH}$ при 914 см^{-1} , $\text{C}-\text{O}$ при 827 и 1247 см^{-1} , $-\text{C}-\text{H}$ при 3055 см^{-1} . В качестве аналитической полосы будем использовать полосу поглощения в области $(830 \pm 3) \text{ см}^{-1}$ [8]. По интенсивности данной полосы можно судить о деформационных колебаниях связи $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ в эпоксидной группе, а, следовательно, и о количестве реакционно-способных эпоксидных групп в полимере. Анализ ИК-спектров композитов на основе ЭД-20 и стирол-акриловой дисперсии (САД) (см. рис. 1) показывает, что степень конверсии (исчезновение реакционно-способных групп) у них выше (в 8 раз у композита с 15 масс. % ЭД-20 и в 20 раз – с 4 масс. % ЭД-20), чем у эпоксидной смолы без добавок.

Наибольшее количество остаточных реакционно-способных групп наблюдается у отвержденной эпоксидной смолы ЭД-20, что связано с недостатком отвердителя. При взаимодействии функциональных групп $-\text{OH}$, входящих в состав карбоксильных групп стирол-акриловой дисперсии, с эпоксидными группами происходит раскрытие эпоксидного кольца с образованием вторичных гидроксильных групп по реакции



которые раскрывают эпоксидное кольцо другой молекулы смолы. В результате протекания такого процесса формируются последовательные связи, а присутствие стирольного блока повышает степень линейной полимеризации эпоксидной смолы. Представленный выше механизм взаимодействия компонентов полимерного композиционного материала подтверждается результатами исследований, показанными на рис. 1. Полоса поглощения в области $(3415 \pm 2) \text{ см}^{-1}$ характерна для вторичных гидроксильных групп, образующихся в результате раскрытия эпоксидного цикла. В образце с содержанием ЭД-20 4 масс. % (кривая 2) повышенное присутствие гидроксильных групп

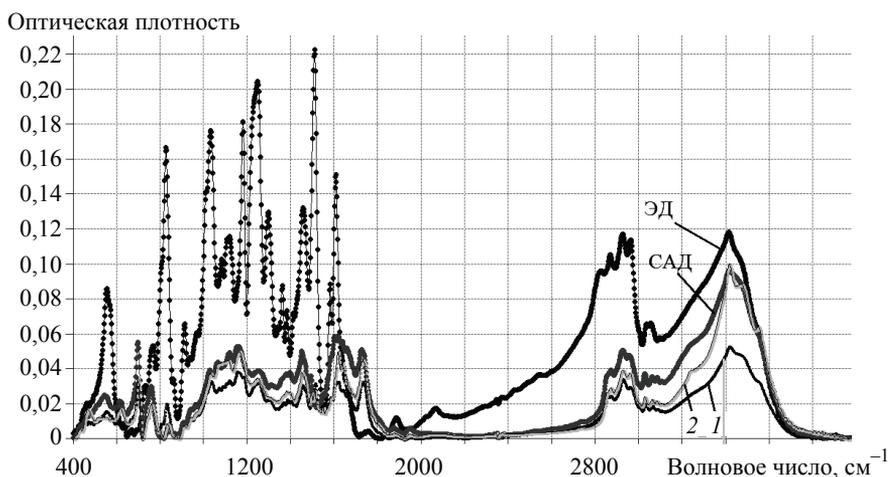


Рис. 1. ИК-спектры исследуемых материалов

связано с увеличением степени конверсии в результате реакции с компонентами стирол-акриловой дисперсии.

Степень поперечного сшивания, то есть группировку молекул в трехмерную структуру через реакционно-способные участки, оценим по деформационным (вещным) колебаниям связи N—H в аминогруппе C—NH₂. Такие колебания проявляются в виде полосы поглощения в диапазоне 700...900 см⁻¹. Согласно данным (см. рис. 1), смоле ЭД-20, отвержденной полиэтиленполиаминным отвердителем, и образцу (кривая 1) соответствует полоса поглощения 862 см⁻¹, а образцу (кривая 2) – 875 см⁻¹. В сравнении с эпоксидной смолой степень поперечного сшивания в образце с содержанием ЭД-20 15 масс. % уменьшилась в 8 раз, а образце (кривая 2) – в 30 раз. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что снижение концентрации ЭД-20 в композите приводит к пропорциональному снижению числа поперечных сшивков, что связано с образованием большего числа линейных связей.

Таким образом, добавка стирол-акриловой дисперсии в эпоксидную смолу повышает количество линейных связей, обеспечивающих пластичность полученного полимерного композиционного материала. Дополнительное взаимодействие эпоксидных групп с карбоксильными группами дисперсии приводит к образованию реакционно-способных гидроксильных групп, благодаря которым обеспечивается высокая адгезия композита к различного вида основаниям. Следует полагать, что полимерная матрица с увеличенным количеством функциональных гидроксильных групп будет изменять условия гидратации цементных минералов, обеспечивая химически прочную их фиксацию в составе полимер-минеральных композиционных материалов.

Список литературы

1. Структура и физико-механические свойства гибридных композиций на основе ненасыщенного полиэфирного олигомера и портландцемента / Д. А. Дрожжин [и др.] // Известия высш. учеб. заведений. Сер.: Химия и хим. технология. – 2007. – Т. 50, № 3. – С. 29 – 35.
2. Fahad, B. M. The Mechanical Properties of Polymer-Mortar Composites / B. M. Fahad, Kh. M. Eweed, Ya. M. Abdalateef // Journal of Engineering and Development. – 2015. – Vol. 19, No. 3. – P. 81 – 95.
3. Устинова, Т. П. Направленное регулирование структуры и свойств полимерматричных композиционных материалов / Т. П. Устинова, Ю. А. Кадыкова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 4. – С. 644 – 652. doi: 10.17277/vestnik.2015.04.pp.644-652
4. Добавки в бетон / В. С. Рамачандран [и др.]. – М. : Стройиздат. – 1988. – 575 с.
5. Мордасов, М. Д. Разработка многофункциональных полимер-минеральных материалов и покрытий [Электронный ресурс] / М. Д. Мордасов // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития : сб. науч. ст. молодых ученых, аспирантов и студентов. – Тамбов, 2017. – Вып. IX. – С. 28 – 31. – Режим доступа : http://www.tstu.ru/book/elib/pdf/stmu/2017/ssmu_17.pdf (дата обращения: 17.12.2018).
6. Мордасов, М. Д. Исследование структуры полимерного композиционного материала / М. Д. Мордасов, Д. М. Мордасов // Сб. материалов 71-й Всерос. науч.-техн. конф. студ., магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с междунар. участием, 18 апреля, 2018 г., Ярославль. – Ярославль, 2018. – Ч. 2. – С. 464 – 466.
7. Мордасов, Д. М. Влияние истинной плотности частиц порошковых систем на их фрактальную размерность / М. Д. Мордасов, А. В. Фирсова, Д. М. Мордасов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 348 – 355. doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.348-355

A Study of the Structure of the Polymer Composite Material Based on ED-20 Resin and Copolymer Nanodispersion of Styrene and Acrylic Acid

D. M. Mordasov¹, P. V. Makeev¹, D. L. Polushkin², M. D. Mordasov¹

*Department of Materials and Technology (1); Institute of Technology (2),
TSTU, Tambov, Russia; mit@mail.nnn.tstu.ru*

Keywords: IR-spectroscopy; composite material; nanodispersion; polymer; absorption spectrum; structure; characteristic frequencies.

Abstract: The IR-spectral analysis of polymer composites based on epoxy resin and nanoscale water dispersion of a copolymer of styrene and acrylic acid was carried out. A polyethylene polyamine composition was used as a hardener of epoxy resin. Based on the analysis of the absorption spectra of IR radiation, it was found that the interaction of epoxy resin with a hardener results in transverse intermolecular bonds, and in the presence of carboxyl groups of the styrene-acrylic copolymer, epoxy rings are opened to form secondary hydroxyl groups and a linear polymer structure is formed. Increasing the degree of linear polymerization of epoxy resin causes plasticity of the material, and the presence of reactive hydroxyl groups leads to high adhesion to various types of bases and the ability to form chemically strong bonds with mineral fillers when using a polymer composite as a matrix of polymer-mineral composite materials.

References

1. Drozhzhin D.A., Kandyrin L.B., Samatadze A.I., Kuleznev V.N., Ur'yev N.B. [Structure and physicomechanical properties of hybrid compositions based on unsaturated polyester oligomer and Portland cement], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Proceedings of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology], 2007, vol. 50, no. 3, pp. 29-35. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Fahad B.M., Eweed Kh.M., Abdalateef Ya.M. The Mechanical Properties of Polymer-Mortar Composites, *Journal of Engineering and Development*, 2015, vol. 19, no. 3, pp. 81-95.
3. Ustinova T.P., Kadykova Yu.A. [Directional regulation of the structure and properties of polymeric composite materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 4, pp. 644-652, doi: 10.17277/vestnik.2015.04.pp.644-652 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Ramachandran V.S., Fel'dman R.F., Kollepardi M., Mal'khotra V.M., Dolch V.L., Mekhta P.K., Okhama I., Ratinov V.B., Rozenberg T.I., Meylvaganam N.P. *Dobavki v beton* [Concrete additives], Moscow: Stroyizdat, 1988, 575 p. (In Russ.)
5. http://www.tstu.ru/book/elib/pdf/stmu/2017/ssmu_17.pdf (accessed 17 December 2018).
6. Mordasov M.D., Mordasov D.M. *Sbornik materialov 71-y Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, magistrantov i aspirantov vysshikh uchebnykh zavedeniy s mezhdunarodnym uchastiyem* [Collection of materials of the 71st All-Russian Scientific and Technical Conference of students, undergraduates and graduate students of higher educational institutions with international participation], 18 April, 2018, Yaroslavl', 2018, part. 2, pp. 464-466. (In Russ.)

7. Mordasov M.D., Firsova A.V., Mordasov D.M. [Influence of the true density of particles of powder systems on their fractal dimension], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 348-355, doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.348-355 (In Russ., abstract in Eng.)

8. Rudakov O.B., Khorokhordina Ye.A., Glazkov S.S., Khorokhordin A.M., Gubin A.S. [Monitoring the curing of epoxy resin on the content of free bis-phenol A by TLC], *Analitika i kontrol'* [Analytics and control], 2017, vol. 21, no. 2, pp. 135-143, doi: 10.15826/analitika.2017.21.2.004 (In Russ., abstract in Eng.)

Die Untersuchung der Struktur des Polymerverbundwerkstoffs auf Basis von ED-20-Harz und Nanodispersion von Styrol-Acrylsäure-Copolymer

Zusammenfassung: Es ist die IR-Spektralanalyse von Polymerkompositen auf Basis von Epoxidharz und einer nanoskaligen Wasserdispersion des Styrol-Acrylsäure-Copolymers durchgeführt. Als Härter von Epoxidharz wurde die Polyäthylen-Polyamin-Zusammensetzung verwendet. Aufgrund der Analyse der Absorptionsspektren der IR-Strahlung wird gezeigt, dass durch die Wechselwirkung von Epoxidharz mit einem Härter quervernetzte intermolekulare Bindungen gebildet werden. In Gegenwart von Carboxylgruppen des Styrol-Acryl-Copolymers öffnen sich Epoxidringe, die sekundäre Hydroxylgruppen und eine lineare Polymerstruktur bilden. Die Erhöhung des linearen Polymerisationsgrades des Epoxidharzes bewirkt die Plastizität des Materials, und das Vorhandensein reaktiver Hydroxylgruppen führt zu einer hohen Haftung an verschiedenen Arten von Basen und der Fähigkeit, mit Mineralfüllstoffen chemisch starke Bindungen zu bilden, wenn ein Polymerverbundstoff als Matrix der Polymer-Mineral-Verbundwerkstoffmaterialien verwendet wird.

Étude de la structure du matériau composite polymère à la base de la résine ED-20 et de la nanodispersion du copolymère de styrène et du cis-lot acrylique

Résumé: Est effectuée une analyse spectrale infrarouge des matériaux composites polymères à la base d'époxy et de copolymère de styrène et d'acide acrylique nanométrique. La résine époxy a été utilisée comme agent du durcissement de la composition polyéthylène-polyamine. A la base de l'analyse des spectres d'absorption du rayonnement IR, est démontré qu'à l'issue de l'interaction de la résine époxy avec le durcisseur sont formées des liaisons intermoléculaires transversales, et en présence de groupes carboxyliques de copolymère styrène-acrylique, des anneaux époxy sont ouverts pour former des groupes hydroxyles secondaires ainsi qu'une structure polymère linéaire. L'augmentation du degré de polymérisation linéaire de l'époxy est due à la plasticité du matériau et à la présence des groupes hydroxylés réactionnels-une forte adhérence à différents types de bases et une certaine résistance à la formation de liaisons chimiquement solides avec des matières minérales lors de l'utilisation d'un composite polymère comme matrice de matériau composite polymère.

Авторы: *Мордасов Денис Михайлович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материалы и технология»; *Макеев Павел Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы и технология»; *Полушкин Дмитрий Леонидович* – кандидат технических наук, доцент, директор Технологического института; *Мордасов Михаил Денисович* – студент, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Дмитриев Олег Сергеевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ДРЕВЕСНО-НАПОЛНЕННЫЙ КОМПОЗИТ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ

Н. О. Новикова, В. П. Ярцев

*Кафедра «Конструкции зданий и сооружений»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; kzis@nnn.tstu.ru*

Ключевые слова: композит; пеллеты; ресурсосбережение; физико-механические характеристики; эпоксидная смола.

Аннотация: Рассмотрена возможность использования древесных гранул (пеллет) в качестве заполнителя в полимерных композитных материалах. Для различных составов, приготовленных в соответствии с симплекс-решетчатым планом эксперимента, исследованы прочность на изгиб и сжатие в зависимости от смешанных факторов твердой фазы. Построены математические модели и с их помощью установлены оптимальные соотношения компонентов смеси.

Создание, разработка и использование экологичных и надежных строительных материалов является на данный момент актуальным. Тема экологии стоит остро, поскольку в мире много неиспользуемых отходов. Например, в России нет разделения мусора, практически отсутствуют мусоросортировочные заводы и предприятия по его переработке (на переработку идут только 4 % из общего объема отходов [1]). Ежегодно в крупных городах образуется более 5 млн т отходов, которые просто свозят на полигоны или закапывают в землю [2].

Удельная доля древесных отходов в общей доле мусора составляет 15 – 22 %. Их утилизация могла бы помочь разгрузить мусорные полигоны, решить задачи охраны окружающей среды и принести прибыль. Древесина относится к биоразлагаемым материалам, если не пропитана специальными составами, тем не менее ее отходы опасны для окружающей среды. В местах их скопления активно развиваются грибок, плесень, различные насекомые (например, жуки-короеды, клещи). Такая свалка опасна и с точки зрения противопожарной безопасности.

Одним из методов, позволяющих решить этот вопрос, является производство гранул (пеллет). Технология производства проста (сырье измельчают до состояния муки, сушат, в пресс-грануляторе сжимают в гранулы и охлаждают полученный материал), а в качестве сырья идут некачественная древесина, древесные отходы, кора, опилки и другие отходы лесозаготовки [3].

В данной работе предлагается использовать древесные гранулы в качестве заполнителя при изготовлении композитного материала, в качестве связующего – термореактивные смолы. Синергия древесины и полимера уже давно известна и хорошо себя зарекомендовала (ДСП, ДВП, МДФ, фанера, модифицированная полимерами древесина и т.п.).

Для приготовления образцов в качестве вяжущего использована эпоксидно-диановая смола марки ЭД-20 (ГОСТ 10587–84). Для ее отверждения применялся отвердитель марки ПЭПА (полиэтиленполиамин), соответствующий требованиям

ТУ 2413-214-00203312–2002. Соотношение смола : отвердитель, согласно рекомендациям завода-изготовителя, равно 1 : 10. Расход смолы в смеси изменялся согласно плану эксперимента в зависимости от содержания других компонентов в трехкомпонентной смеси «смола – песок – пеллеты».

В качестве заполнителя использовались древесные гранулы (пеллеты), изготовленные из опилок сосновых пород, а также измельченный в вибровращательной шаровой мельнице песок.

Для определения физико-механических характеристик (прочности на изгиб $R_{изг}$, МПа, и центральное сжатие $R_{сж}$, МПа) изготовлены образцы в форме балочек $20 \times 20 \times 120$ мм по три образца-дублера в каждой партии. Готовая смесь после формования отправлялась в термокамеру. В течение двух часов при температуре 100°C образцы выдерживали в камере, а затем их охлаждали до комнатной температуры.

Экспериментальное определение прочности образцов на изгиб и центральное сжатие выполнялось согласно методикам по ГОСТ 10180–2012. Эксперимент реализован в соответствии с симплекс-решетчатый планом типа «состав – свойство» для $q = 3$ переменных, включающего $N = 7$ опытов (табл. 1) [4]. Данный план предусматривает определенный порядок реализации измерений и разработку математической модели в виде неполного полинома второй степени.

Для экспериментальных исследований реализован трехфакторный план, где факторами являются смола z_1 , песок z_2 и пеллеты z_3 , а целевыми функциями – прочность на сжатие, изгиб, плотность.

В каждой точке такого плана должно выполняться условие [4]

$$z_1 + z_2 + z_3 = 1.$$

Используя полученную по результатам измерений модель, предполагалось выполнить поиск оптимальных значений рассматриваемых факторов (удельного веса каждого компонента твердой фазы), обеспечивающих наивысшую прочность исследуемых образцов. В выбранном плане каждый из факторов рекомендуется рассматривать на четырех уровнях: 0; 0,333; 0,5; 1.

Результаты эксперимента приведены в табл. 2, где при исследовании прочности образцов на изгиб дисперсия: $S_{\max}^2 = 1,503$, $\sum S_i^2 = 8,073$, $S_{cp}^2 = 1,153$; на сжатие: $S_{\max}^2 = 1,945$, $\sum S_i^2 = 6,776$, $S_{cp}^2 = 0,968$.

Таблица 1

План эксперимента и уровни изменения рассматриваемых факторов

Номер опыта	z_1	z_2	z_3	x_1 смола	x_2 песок	x_3 пеллеты
1	1	0	0	0,7	0	0,3
2	0	1	0	0,5	0,2	0,3
3	0	0	1	0,5	0	0,5
4	0,5	0,5	0	0,6	0,1	0,3
5	0,5	0	0,5	0,6	0	0,4
6	0	0,5	0,5	0,5	0,1	0,4
7	0,333	0,333	0,333	$0,566 \approx 0,57$	$0,066 \approx 0,07$	0,36

Таблица 2

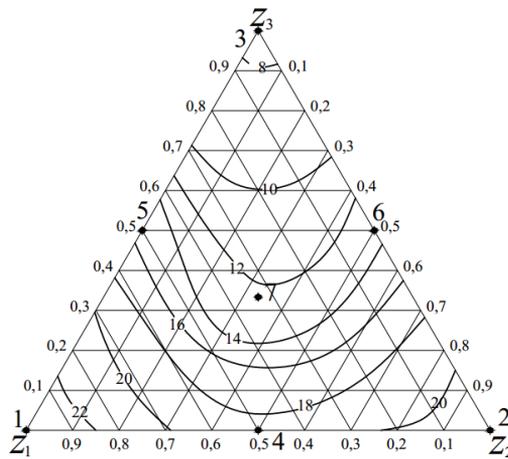
Результаты исследования прочности образцов на изгиб $R_{изг}$ и сжатие $R_{сж}$ МПа, в зависимости от выбранных факторов

Номер опыта	z_1	z_2	z_3	Прочность при изгибе $R_{изг}$, МПа		Дисперсия, S^2	Прочность при сжатии $R_{сж}$, МПа		Дисперсия, S^2
				экспериментальная	средняя		экспериментальная	средняя	
1	1	0	0	24,832	23,895	0,869	70,894	70,524	0,627
				71,500					
				69,960					
				69,300					
				71,000					
2	0	1	0	22,968	21,989	1,051	70,490	80,748	1,945
				20,832					
				22,782					
				81,760					
				81,200					
3	0	0	1	22,355	7,988	0,850	81,570	65,670	0,271
				6,926					
				8,569					
				82,000					
				78,960					
				8,470			65,670		

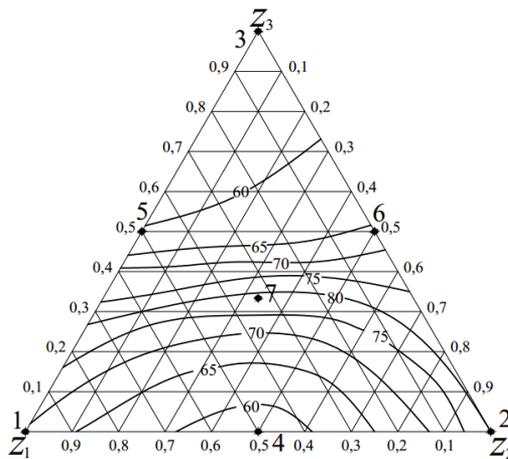
По данным табл. 2 (прочность на изгиб) построен график в виде изолиний рассматриваемой зависимости в координатах псевдофакторов z_i (рис. 1, *a*), согласно которому наивысшая прочность на изгиб Y_1 в данном эксперименте получена в точке 1 и равна 23,895 МПа. Данное значение получено при соотношении смола : песок : pellets = 1 : 0 : 0.

Наименьшая прочность на изгиб полимерных образцов находится в точке 3 ($Y_1 = 7,988$ МПа). Для данной точки характерно большое количество pellets. Очевидно, что при уменьшении числа гранул в полимерной смеси получается более прочный материал.

Рассмотрим область наивысших прочностных показателей (между точками 1 и 2). Из рисунка 1, *a*, видно, что в точке 4 данного треугольника можно получить прочность на изгиб в диапазоне 18...20 МПа. В то же время, двигаясь от нее вправо или влево, можно получить материал прочнее.



a)



б)

Рис. 1. Прочности на изгиб $R_{изг}$, МПа, (*a*) и сжатие $R_{сж}$, МПа, (*б*) полимерных образцов в зависимости от содержания компонентов в координатах псевдофакторов:

смола z_1 , песок z_2 , pellets z_3

Следовательно, для получения повышенной прочности на изгиб следует выбирать смеси с соотношением смола : песок : pellets = 1 : 0 : 0; 0,9 : 0,1 : 0; 0,8 : 0,2 : 0; 0,7 : 0,3 : 0; 0,2 : 0,8 : 0; 0,1 : 0,9 : 0; 0 : 1 : 0. Между точками 1 и 5 это будет соотношение смеси, равное 0,9 : 0 : 0,1, между точками 2 и 6 – 0 : 0,9 : 0,1.

По данным табл. 2 (прочность на сжатие) построен график в виде изолиний рассматриваемой зависимости в координатах псевдофакторов z_i (рис. 1, б), из которого видно, что наивысшая прочность на сжатие Y_2 получена в точке 2 и равна 80,748 МПа. Область наивысших прочностей располагается около точки 7 и снижается к точке 2. Замечено, что при движении из точки Z_2 в Z_3 , когда количество песка в полимерной смеси уменьшается, а количество pellets увеличивается, начиная с соотношения компонентов смеси смола : песок : pellets – 0 : 0,8 : 0,2, наблюдается снижение прочности на сжатие.

Высокое значение прочности на сжатие можно получить, используя рецептуру соотношения компонентов, полученную между точками 1 и 5, а именно соотношение компонентов равное, например, 0,75 : 0 : 0,25. Выбирать соотношения компонентов из этой области более рационально, поскольку в данном промежутке не наблюдается такой резкий скачок прочности на сжатие, который замечен в области между точками 2 и 6.

Наименьшая прочность полимерных образцов на сжатие наблюдается в области-треугольнике точек 3, 5, 6, для которой характерно большое содержание гранул (pellets). Также идет снижение прочности материала на сжатие в точке 4, где имеет место равное содержание двух факторов (смола и песок).

Учитывая полученные результаты по физико-механическим характеристикам материала, данный композит на основе эпоксидной смолы можно использовать в качестве конструктивного материала для несущих и самонесущих конструкций. Например, изготавливать фундаментные блоки для малоэтажного жилого строительства или, учитывая стойкость эпоксидных композитов к агрессивным средам, применять при строительстве зданий и сооружений, в которых может быть такое воздействие на конструкции.

Список литературы

1. Мусорная статистика: в России перерабатываются только 4% отходов [Электронный ресурс] // Информационно-аналитический интернет-портал «МИР 24». – Режим доступа : <https://mir24.tv/news/16268644/musornaya-statistika-v-rossii-pererabatyvayutsya-tolko-4-othodov> (дата обращения: 25.12.2018)
2. Пути отходов [Электронный ресурс] // Электрон. журнал «Вокруг света». – Июль, 2012. – Режим доступа : <http://www.vokrugsveta.ru/vs/article/7755> (дата обращения: 25.12.2018)
3. Что такое pellets [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://woodheat.ru/pellet.html> (дата обращения: 25.12.2018)
4. Зедгинидзе, И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И. Г. Зедгинидзе. – М. : Наука, 1976. – 390 с.

Wood-Filled Epoxy Resin Composite

N. O. Novikova, V. P. Yartsev

Department of Buildings and Structures, TSTU, Tambov, Russia; kzis@nnn.tstu.ru

Keywords: composite; pellets; resource saving; physical and mechanical characteristics; epoxy resin.

Abstract: The possibility of using wood pellets as a filler in polymer composite materials is considered. For different compositions prepared in accordance with the simplex-lattice plan of the experiment, the flexural and compressive strengths were investigated depending on the mixed factors of the solid phase. Mathematical models were constructed and with their help the optimum ratios of the mixture components were established.

References

1. <https://mir24.tv/news/16268644/musornaya-statistika-v-rossii-pererabatyvayutsya-tolko-4-otodov> (accessed 25 December 2018)
2. <http://www.vokrugsveta.ru/vs/article/7755> (accessed 25 December 2018)
3. <http://woodheat.ru/pellet.html> (accessed 25 December 2018)
4. Zedginidze I.G. *Planirovanie eksperimenta dlya issledovaniya mnogokomponentnykh sistem* [Planning an experiment to study multicomponent systems], Moscow: Nauka, 1976, 390 p. (In Russ.)

Holzgefüllter Verbundstoff auf Basis von Epoxidharz

Zusammenfassung: Es ist die Möglichkeit betrachtet, Holzpellets als Füllstoff in Polymerverbundwerkstoffen zu verwenden. Für verschiedene Zusammensetzungen, die gemäß dem Simplex-Gitter-Plan des Experiments hergestellt worden sind, sind die Biege- und Druckfestigkeiten in Abhängigkeit von den Mischfaktoren der Festphase untersucht. Es sind mathematische Modelle erstellt und mit deren Hilfe die optimalen Mischungsverhältnisse festgelegt.

Composite rempli de bois à la base de résine époxy

Résumé: Est envisagée la possibilité d'utiliser des granulés de bois comme remplisseur dans des matériaux composites polymères. Pour de différentes compositions préparées selon le plan simplex-treillis de l'expérience, sont étudiées la résistance à la flexion et celle à la compression en fonction des facteurs de mélange de la phase solide. Sont construits les modèles mathématiques et sont établis des rapports optimaux des composants dans le mélange.

Авторы: *Новикова Наталья Олеговна* – магистрант; *Ярцев Виктор Петрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкции зданий и сооружений», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Леденёв Виктор Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкции зданий и сооружений», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ НА ПРОЧНОСТЬ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫВОДОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

И. С. Филатов, И. С. Армянинов, Т. Р. Маматказин

*Кафедра «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ»,
г. Тамбов, Россия; ridder@mail.ru*

Ключевые слова: золотая подложка; интегральные микросхемы; контроль качества соединений; проводники с золотым покрытием; технология сварки «шарик – клин»; ультразвуковая сварка.

Аннотация: Исследованы зависимости прочности микросварных соединений от параметров ультразвуковой микросварки: усилия прижима, величины тока, подаваемого на генератор ультразвуковых колебаний, времени сварки. Получены параметры, при которых наблюдалась наибольшая прочность соединений контактов. Решена одна из главных задач в области сборки интегральных микросхем, а именно, подобраны оптимальные параметры для соединений типа «шарик – клин», формируемые из золотой проволоки на подложке с золотым покрытием на установке ультразвуковой микросварки, при которых прочность данных соединений будет максимальной.

Метод соединения микросхем должен удовлетворять следующим требованиям: прочность соединения близка к прочности соединяемых элементов микросхем; минимальное омическое сопротивление соединения; минимально возможные основные параметры процесса соединения (температура нагрева, удельное давление и длительность выдержки), с тем чтобы не повреждались элементы схемы; выполнение соединения материалов разнообразных сочетаний и типоразмеров; после соединения не должно оставаться материалов, вызывающих коррозию; осуществление контроля качества соединений простыми и надежными методами [1]. Из общеизвестных способов сварки при производстве микросхем применяют контактную точечную, ультразвуковую, холодную, диффузионную, электронно-лучевую, лазерную, аргонодуговую и микроплазменную [2].

Специально для монтажа микросхем разработано несколько оригинальных способов микросварки давлением: термокомпрессия, сварка давлением с косвенным импульсным нагревом, ультразвуковая сварка с косвенным импульсным нагревом, односторонняя контактная сварка (точечная и шовная).

Ультразвуковая микросварка и комбинированные способы сварки успешно используются при изготовлении гибридных схем, транзисторов и интегральных схем. Основными параметрами процесса при ультразвуковой микросварке являются амплитуда колебаний рабочего торца-инструмента, которая зависит от электрической мощности преобразователя и конструктивного исполнения колебательной системы; усилие сжатия свариваемых элементов; длительность включения ультразвуковых колебаний [3]. Ультразвуковую микросварку применяют для вы-

полнения монтажа гибкими проводниками, присоединения кристалла к корпусу, беспроводного монтажа интегральных схем методом «перевернутого кристалла», присоединения плоских выводов к кремниевым кристаллам диодов [4].

В ходе проделанной работы исследованы зависимости прочности полученных соединений от параметров ультразвуковой микросварки, таких как усилие прижима, величина тока, подаваемого на генератор ультразвуковых колебаний, время сварки. Получены параметры, при которых обеспечивалась наибольшая прочность соединений контактов. Контроль качества сварных соединений производился в две стадии. Сначала визуальный осмотр соединения на соответствие геометрических параметров общим требованиям [5], затем следовало механическое испытание на отрыв. Температура нагрева изделия также влияет на качество соединений, поэтому проведены исследования и эксперименты по влиянию данного параметра.

Тестируемые соединения сделаны на установке для ультразвуковой сварки микропроводных соединений фирмы Kulicke&Soffa 4700AD. Тесты на прочность получившихся соединений проводились на установке немецкой фирмы TPT H52 Dynamic Search, визуальный контроль сварных соединений – на цифровом оптическом микроскопе NiGoх, плазменная очистка – с использованием установки Nordson March AP-600

На рисунках 1 и 2 показаны общие виды соответственно тестируемых петель и оторванных соединений.

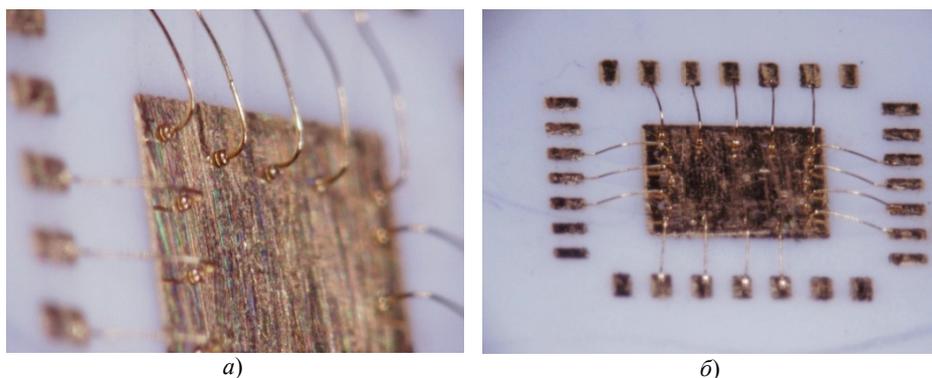


Рис. 1. Общий вид тестируемых петель:
a – отдельных; *б* – общая сборка

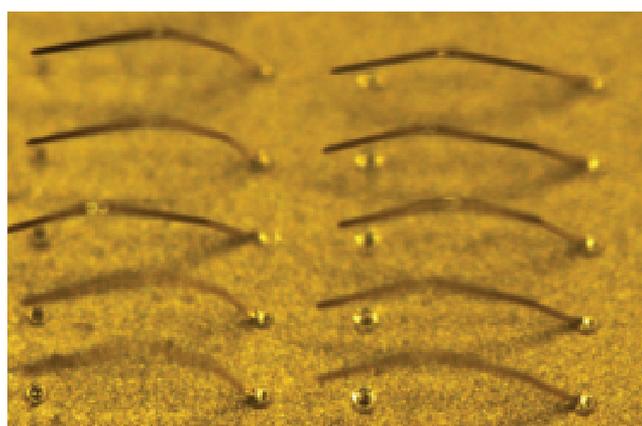


Рис. 2. Общий вид оторванных соединений

В таблице 1 приведены параметры сварочной установки для золотой проволоки диаметром 20 и 25 мкм.

Таблица 1

**Параметры сварочной установки
для золотой проволоки диаметром 20 и 25 мкм**

Параметр	Точка сварки									
	11	22	33	44	55	66	77	88	99	110
Первая точка сварки (сварка «шарика»), Ø 20 мкм										
Мощность сварки, усл. ед.	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
Усилие прижима, усл. ед.	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
Продолжительность сварки, усл. ед.	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4
Усилие на отрыв, г:										
предварительно очищенная в плазме	3,0	4,5	6,5	7,5	9,0	8,0	7,1	6,0	4,0	2,9
предварительно не очищенная	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	3,2	2,9	2,0	1,6	1,1
Вторая точка сварки (сварка «клина»), Ø 20 мкм										
Мощность сварки, усл. ед.	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8
Усилие прижима, усл. ед.	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8
Продолжительность сварки, усл. ед.	4,0	4,4	4,8	5,2	5,6	6,0	6,4	6,8	7,2	7,6
Усилие на отрыв, г:										
предварительно очищенная в плазме	5,0	5,9	6,0	8,2	9,3	10,1	8,9	8,1	6,0	4,4
предварительно не очищенная	2,2	2,6	3,2	3,5	4,0	3,2	2,8	2,0	1,3	1,1
Первая точка сварки (сварка «шарика»), Ø 25 мкм										
Мощность сварки, усл. ед.	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Усилие прижима, усл. ед.	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Продолжительность сварки, усл. ед.	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0
Усилие на отрыв, г:										
предварительно очищенная в плазме	3,3	4,8	6,6	7,6	9,2	10,1	7,2	6,1	4,1	3,0
предварительно не очищенная	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0	3,0	2,4	1,8	1,3
Вторая точка сварки (сварка «клина»), Ø 25 мкм										
Мощность сварки, усл. ед.	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0
Усилие прижима, усл. ед.	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0
Продолжительность сварки, усл. ед.	4,0	4,4	4,8	5,2	5,6	6,0	6,4	6,8	7,2	7,6
Усилие на отрыв, г:										
предварительно очищенная в плазме	3,3	4,8	6,6	7,6	9,2	10,1	7,2	6,1	4,1	3,0
предварительно не очищенная	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0	3,0	2,4	1,8	1,3

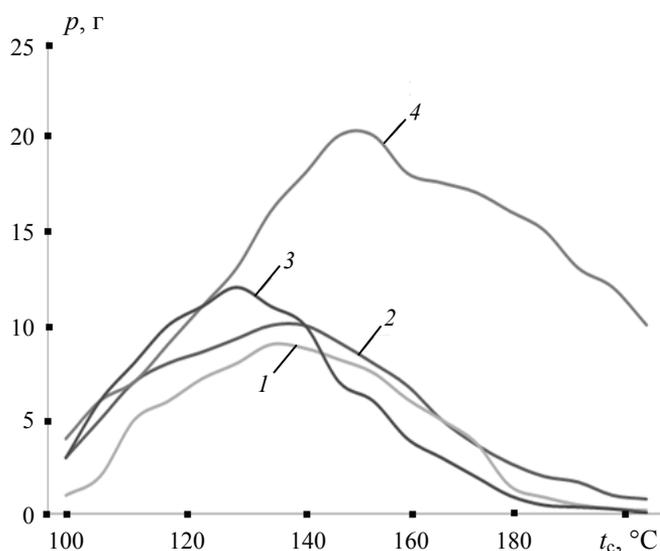


Рис. 3. График зависимости прочности сварных соединений p от температуры столка t_c для проволоки \varnothing , мкм:
 1 – 20; 2 – 25; 3 – 30; 4 – 50

В ходе проведения исследований выявлено, что на прочность соединений методом ультразвуковой сварки существенное влияние оказывает температура столка. График зависимости прочности сварного соединения от температуры столка (при других постоянных параметрах сварки) показан на рис. 3.

Температура столка, на котором устанавливается плата (подложка) перед сваркой проволочных выводов, для каждого размера поперечного сечения золотой проволоки подбирается в зависимости от режима сварки. Для выбранного режима сварки проволоки $\varnothing 20$ мкм соответствует интервал температур 133...146 °C; $\varnothing 25$ мкм – 136...145 °C; $\varnothing 30$ мкм – 125...133 °C; $\varnothing 50$ мкм – 143...157 °C.

Исходя из проведенных исследований сделан вывод о многогранности факторов, влияющих на прочность соединений проводников электронных микросхем, учитывая которые можно добиться существенного увеличения качества соединения выводов изделий полупроводниковой техники. Полученные данные позволяют провести отработку технологического процесса сварки проводников с учетом их материала и толщины, что способствует дальнейшим исследованиям.

Список литературы

1. Хорин, И. А. Технологии электронной компонентной базы : учеб. пособие / И. А. Хорин. – Саратов : IPR Медиа, 2018. – 278 с.
2. Фомин, Д. В. Основы компьютерной электроники : учеб. пособие / Д. В. Фомин. – Саратов : Вузовское образование, 2017. – 107 с.
3. Конюшков Г.В. Специальные методы сварки плавлением в электронике : учеб. пособие / Г. В. Конюшков, В. Г. Конюшков, В. Ш. Авагян. – М. : Дашков и К, 2017. – 144 с.
4. Чуриков, А. А. Метод неразрушающего теплофизического контроля образцов малых геометрических размеров из твердых материалов / А. А. Чуриков, Л. Л. Антонова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2005. – Т. 11, № 3. – С. 618 – 624.

The Effect of Ultrasonic Welding Parameters on the Strength of Contact Joints of Integrated Circuit Pins

I. S. Filatov, I. S. Armyaninov, T. R. Mamatkazin

*Department of Materials and Technology, TSTU,
Tambov, Russia; ridder@mail.ru*

Keywords: gold substrate; integrated circuits; quality control of compounds; gold plated conductors; ball-wedge welding technology; ultrasonic welding.

Abstract: The dependences of the strength of micro-welded joints on the parameters of ultrasonic micro-welding, such as pressing force, current supplied to the ultrasonic oscillator and welding time are investigated. The parameters for the highest strength of the contact connections are obtained. One of the main tasks in the field of assembling integrated circuits has been solved; the optimal parameters have been selected for joints of the “ball – wedge” type formed from gold wire on a gold coated substrate on an ultrasonic micro welding system, at which the strength of these joints is maximum.

References

1. Khorin I.A. *Tekhnologii elektronnoy komponentnoy bazy* [Technologies of electronic component base], Saratov: IPR Media, 2018, 278 p. (In Russ.)
 2. Fomin D.V. *Osnovy komp'yuternoy elektroniki* [Basics of computer electronics], Saratov: Vuzovskoye obrazovaniye, 2017, 107 p. (In Russ.)
 3. Konyushkov G.V., Konyushkov V.G., Avagyan V.Sh. *Spetsial'nyye metody svarki plavleniyem v elektronike* [Special methods of fusion welding in electronics], Moscow: Dashkov i K, 2017, 144 p. (In Russ.)
 4. Churikov A.A., Antonova L.L. [Method of non-destructive thermal and physical control of samples of small geometric dimensions of solid materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2005, vol. 11, no. 3, pp. 618-624. (In Russ., abstract in Eng.)
 5. Moskvitin S.P., Pudovkin A.P. [Method and system for monitoring the quality characteristics of a bimetal], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2009, vol. 15, no. 2, pp. 315-320. (In Russ., abstract in Eng.)
-

Die Wirkung von Ultraschallschweißparametern auf die Festigkeit der Kontaktverbindungen integrierter Schaltkreisausgänge

Zusammenfassung: Es sind die Abhängigkeiten der Festigkeit der Mikroschweißverbindungen von den Parametern des Ultraschall-Mikroschweißens untersucht: Druckkraft, Stromstärke, die dem Generator von Ultraschallschwingungen

zugeführt wird, Schweißzeit. Es sind die Parameter erhalten, bei denen die höchste Festigkeit der Kontaktverbindungen beobachtet wurde. Eine der Hauptaufgaben im Bereich der Montage von integrierten Schaltkreisen ist gelöst, und zwar: es sind die optimalen Parameter für Verbindungen vom Typ "Kugelkeilverbindungen" ausgewählt, die aus Golddraht auf einer goldbeschichteten Unterlage mit der Ultraschall-Mikroschweißanlage hergestellt werden, bei denen die Festigkeit dieser Verbindungen maximal ist.

Influence des paramètres du soudage par ultrasons sur la résistance des connexions de contact des bornes des circuits intégrés

Résumé: Sont étudiées les dépendances de la résistance des micro-soudures des paramètres de micro-soudage par ultrasons: force de serrage, valeur du courant fourni au générateur d'oscillations à ultrasons, temps de soudage. Sont obtenus les paramètres dans lesquels les contacts sont les plus forts. Est résolue une des principales tâches dans le domaine de l'assemblage des circuits intégrés, à savoir, les paramètres optimaux pour les connexions du type "perle – coin" formés à partir du fil d'or sur le substrat avec un revêtement d'or sur l'installation de micro-soudage par ultrasons, dans lequel la force deces de assemblages sera maximale.

Авторы: *Филатов Иван Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы и технология»; *Армянинов Иван Сергеевич* – магистрант; *Маматказин Тимур Рифатович* – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Дмитриев Олег Сергеевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ УГЛЕРОДНЫХ ЧАСТИЦ НА СТЕПЕНЬ ИОНИЗАЦИИ ПЛАМЕНИ

С. Н. Баршутин, Э. А. Мешкова

*Кафедра «Энергообеспечение предприятий и теплотехника»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; asp@yandex.ru*

Ключевые слова: ионизация пламени; термоэлектронная эмиссия; углеродные частицы.

Аннотация: Исследованы ионизационные процессы в пламени. В частности, рассмотрено влияние термоэлектронной эмиссии электронов из твердой фазы углерода и возможные физико-математические модели, описывающие данный процесс. Разработана модель ионизации пламени, и проведена оценка вклада термоэмиссионных электронов в общую степень ионизации пламени.

В электрофизическом плане основной параметр пламени – его степень ионизации. Основным соотношением, описывающим ионизационное состояние продуктов сгорания, является формула Саха, по которой возможно определить концентрацию электронов в случае, если система находится в условиях термодинамического равновесия [1].

Однако в большинстве углеводородных факелов концентрация ионизированных частиц не поддается описанию формулой Саха. Концентрация электронов в реальных экспериментах оказалась намного больше. Исследования, проведенные рядом авторов, обобщены в [1] и показывают, что большую роль в разнице степени ионизации теоретической, посчитанной по формуле Саха, и экспериментальной играет ионизация конденсированных частиц. В частности, образуемые частицы углерода в пламени имеют работу выхода 4 эВ, что позволяет эффективно снабжать пламя электронами, повышая при этом степень ионизации. В рассмотренных работах предложено соотношение, позволяющее определить концентрацию электронов в пламени [1]:

$$n_e = 2 \left(\frac{2\pi m_q - k_B T}{h^2} \right)^{1,5} \exp\left(-\frac{\varphi_0}{k_B T}\right) \exp\left(-\frac{n_{en}}{n_p} \frac{z_e^2}{rk_B T}\right), \quad (1)$$

где m_q – масса частицы; k_B – постоянная Больцмана; T – температура частиц; h – постоянная Планка; φ_0 – работа выхода электрона из конденсированной фазы; n_{en} – начальная концентрация электронов; n_p – концентрация конденсированных частиц; r – радиус частиц; z_e – заряд электрона.

Проведем подробный анализ соотношения (1), учитывающего эмиссию электронов из конденсированной фазы, который позволил выделить три множителя, оказывающих влияние на концентрацию.

Подстановка значений в первый множитель $\left((2\pi m_q - k_B T)/h^2\right)^{1,5}$ при любых величинах реальной температуры переводит его в поле комплексных чисел. Поэтому использование уравнения (1) в исходном виде не представляется возможным. Анализ размерности данного множителя показал отсутствие физическо-

го смысла в действиях с физическими величинами, входящими в его состав. Невозможно из массы вычесть энергию. Так как остальные множители являются экспонентой, то представленный для анализа множитель должен иметь размерность концентрации n_e , например см^{-1} , моль $^{-1}$ и т.д. Если даже представить массу через энергию, и верхнюю часть привести к размерности Дж, то нижняя часть, квадрат постоянной Планка, имеет размерность $\text{Дж}^2 \cdot \text{с}^2$. В итоге множитель будет иметь размерность $\text{Дж}^{-1.5} \cdot \text{с}^{-3}$, что еще раз доказывает невозможность применения формулы (1) в том виде, в котором она приведена в работе [1].

Представим, что данная формула выведена эмпирически, и основная изменяющаяся физическая величина – температура. Тогда для получения реальных значений множителя необходимо, чтобы масса m_q при $T = 1600$ К соответствовала следующему неравенству

$$m_q > \frac{k_B T}{2\pi} = 3,517 \cdot 10^{-21} \text{ кг.}$$

Определим минимальное число атомов, которое должна содержать конденсированная частица, чтобы значение концентрации имело реальную величину и не находилось в области комплексных чисел.

Масса одного атома углерода $1,9926 \cdot 10^{-23}$ г. Тогда при делении массы конденсированной частицы на массу углерода получим число атомов углерода, равное $1,7644 \cdot 10^5$ шт. При оценке размера данной частицы величина оказывается в пределе 13 нм.

Предполагая повышение ионизации пламени за счет термоэлектронной эмиссии в уравнении не учтено, что для термоэлектронной эмиссии электронов из сажевых частиц необходима энергия порядка 4 эВ. Однако такой энергии в пламени без наложения электрического поля можно достичь только при температуре выше 40 000 К, что в реальном пламени с температурой максимум 2500 К практически невозможно. Единственной возможностью сообщить электрону необходимую энергию является формирование электрического поля с соответствующей напряженностью.

Так как уравнение (1) вызывает много вопросов, проведем оценку влияния термоэлектронной эмиссии на концентрацию электронов в пламени исходя из основного уравнения термоэлектронной эмиссии – формулы Ричардсона

$$j = A_0 T^2 \exp\left(-\frac{\phi}{k_B T}\right), \quad (2)$$

где ϕ – работа выхода; $A_0 = \frac{4\pi m_e k_B^2 z_e}{h^3} = 120 \text{ А}/(\text{см}^2 \cdot \text{град}^2)$.

С другой стороны, плотность тока определяется по соотношению

$$j = I/S, \quad (3)$$

где I – электрический ток; S – площадь объекта термоэлектронной эмиссии.

Ток определим как

$$I = z_e n_e / t, \quad (4)$$

где n_e – концентрация электронов, образованная за счет термоэлектронной эмиссии; t – интервал времени.

Площадь объекта найдем из следующих приближений. Представим, что объект термоэлектронной эмиссии имеет шарообразную форму, тогда площадь определяется по формуле

$$S = \pi d^2 n_p, \quad (5)$$

где d – диаметр частицы.

Объединим выражения (2) – (5) и выразим концентрацию электронов

$$n_e = \frac{t\pi d^2 n_p A_0 T^2}{z_e} \exp\left(-\frac{\phi}{k_B T}\right). \quad (6)$$

Данная формула позволяет определить число вышедших электронов из конденсированной фазы за счет термоэлектронной эмиссии за период времени t для одного моля исследуемого объема.

Однако, при нормальном атмосферном давлении время жизни электрона в свободном состоянии определяется условием рекомбинации либо на нейтральной компоненте с появлением отрицательно заряженного иона, либо на положительном ионе. Время, проведенное до столкновения, и является временем жизни. Для его оценки необходимо определить частоту столкновений заряженных частиц с нейтральной компонентой пламени.

При отсутствии внешнего воздействия электрического поля или его незначительном значении частоту столкновения v_{en} возможно определить по следующему соотношению [2]:

$$v_{en} = \frac{8}{3\sqrt{\pi}} \int v_{en}(v) w^4 \exp(-w^2) dw; \quad (7)$$

$$v_{en}(v) = \sum_j n_j v \int \sigma_{ej}(v, \chi) (1 - \cos \chi) 2\pi \sin(\chi) d\chi; \quad (8)$$

$$w = v / \sqrt{\frac{2k_B T}{m_q}}, \quad (9)$$

где v – скорость электрона; $\sigma_{ej}(v, \chi)$ – дифференциальное сечение рассеяния электронов на нейтральной компоненте j ; χ – угол рассеяния.

Преобразуя эффективное сечение рассеяния, представленное в [3], получим выражение для дифференциального сечения рассеивания электронов на j -й компоненте

$$d\sigma_{ej}(v, \chi) = \frac{z_e^4 \pi \sin(\chi)}{2m_q^2 v^4 \left(\sin\left(\frac{\chi}{2}\right)\right)^4} d\chi. \quad (10)$$

Решением интеграла в формуле (8) получим значение частоты столкновений v_{en} в зависимости от угла и скорости частицы

$$v_{en}(v) = \sum_j (n_j Z_j) \frac{2z_e^4 \pi}{m_q v} \log\left(\sin\left(\frac{\chi}{2}\right)\right) + C_1, \quad (11)$$

где C_1 – константа, образованная после интегрирования.

Дальнейшее решение уравнения (7) преобразует его к виду

$$v_{en} = \frac{\exp(-w^2)}{3\sqrt{\pi}} \left(3\sqrt{\pi} C_1 \exp(w^2) \operatorname{erf}(w) - 8 \sum_j (n_j Z_j) \frac{z_e^4 \pi}{m_q} \times \right. \\ \left. \times \log\left(\sin\left(\frac{\chi}{2}\right)\right) (w^2 + 1) - 2C_1 w (2w^2 + 3) \right) + C_2, \quad (12)$$

где C_2 – вторая константа, образованная после интегрирования; функция ошибок $\text{erf}(w)$ определяется по формуле

$$\text{erf}(w) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^w \exp(-t^2) dt. \quad (13)$$

В равновесном состоянии, когда распределение электронов соответствует максвелловскому распределению, кинетическая энергия электронов определяется по соотношению

$$E_k = \frac{sk_B T}{2}, \quad (14)$$

где s – число степеней свободы частицы.

Кинетическая энергия может определяться по классической формуле

$$E_k = \frac{m v^2}{2}. \quad (15)$$

Объединив уравнения (14) и (15), скорость электрона может быть определена по следующему выражению

$$v = \sqrt{\frac{sk_B T}{m}}, \quad (16)$$

где s – число степеней свободы (для электрона $s = 2$).

Формула (16) согласуется с данными [4]

$$v = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}}. \quad (17)$$

Таким образом, формула (17) позволяет определить среднюю скорость частиц в газе с температурой T и массой m . По частоте столкновения определим время жизни электрона

$$t = \frac{n_e}{v_{en}}. \quad (18)$$

Концентрация электронов, образованных за счет термоэлектронной эмиссии, будет определяться по следующему соотношению

$$n_e = \frac{n_{es} \pi d^2 n_p A_0 T^2 \exp\left(-\frac{\Phi}{k_B T}\right)}{v_{en} z_e - \pi d^2 n_p A_0 T^2 \exp\left(-\frac{\Phi}{k_B T}\right)}. \quad (19)$$

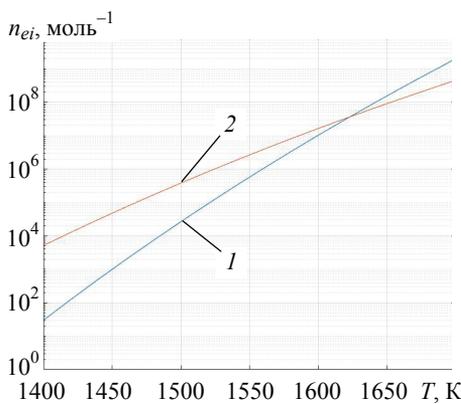


Рис. 1. Зависимость концентрации свободных электронов, образованных за счет:

1 – термоэлектронной эмиссии;
2 – по уравнению Саха

Полученное соотношение позволяет оценить вклад термоэлектронной эмиссии из углеродных частиц с меньшими значениями.

Сравним вклад в концентрацию электронов за счет повышения температуры по уравнению Саха [1] и за счет термоэлектронной эмиссии (рис. 1). Диапазон температур выберем более близкий к температуре сгорания бензина в среде воздуха.

Из графиков (см. рис. 1) видно, что вклад в ионизацию за счет термоэлектронной эмиссии до 1620 К меньше,

чем за счет термической ионизации, но уже при температуре 1700 К динамика формирования свободных электронов увеличивается, и концентрация, получаемая за счет термоэлектронной эмиссии, почти в 4,4 раза больше, чем при простой термической ионизации, описываемой уравнением Саха.

Список литературы

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учеб. пособие для вузов / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов. – М. : Юрайт, 2013. – 435 с.
2. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Кн. 1 : вводный том / под ред. В. Е. Фортова. – М. : Наука, 2000. – 585 с.
3. Фейнман, Р. Квантовая механика и интегралы по траекториям / Р. Фейнман, А. Хибс ; пер. с англ. Э. М. Барлита и Ю. Л. Обухова ; под ред. В. С. Барашенкова. – М. : Мир, 1968. – 382 с.
4. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. – 3-е изд., испр. и доп. – Долгопрудный : Интеллект, 2009. – 736 с.
5. Баршутина, М. Н. Исследование электрических свойств полимерных диэлектрических матриц с наноструктурными объектами / М. Н. Баршутина, С. Н. Баршутин, А. В. Ушаков // Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2014. – № С (52). – С. 16 – 19.
6. Чернышова, Т. И. Информационно-аналитическая система оценки и прогнозирования метрологической надежности электронных измерительных средств / Т. И. Чернышова, М. А. Каменская // Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2014. – № С (52). – С. 111 – 114.

Investigation of the Effect of Thermionic Emission of Electrons on the Degree of Flame Ionization

S. N. Barshutin, E. A. Meshkova

*Department of Power Supply of Enterprises and Heat Engineering,
TSTU, Tambov, Russia; aspir@yandex.ru*

Keywords: flame ionization; thermionic emission; carbon particles.

Abstract: Ionization processes in a flame are investigated. In particular, the influence of the thermionic emission of electrons from the solid carbon phase and possible physical and mathematical models describing this process are considered. A model of flame ionization was developed; the contribution of thermionic electrons to the total degree of flame ionization was evaluated.

References

1. Kukin P.P., Yushin V.V., Yemel'yanov S.G. *Teoriya goreniya i vzryva: ucheb. posobiye dlya vuzov* [Theory of Combustion and Explosion: studies. manual for universities], Moscow: Yurayt, 2013, 435 p. (In Russ.)
2. Fortov V.Ye. [Ed.] *Entsiklopediya nizkotemperaturnoy plazmy. Kn. 1: vvodnyy tom* [Encyclopedia of low-temperature plasma. Prince 1: introductory volume], Moscow: Nauka, 2000, 585 p. (In Russ.)
3. Feynman R., Khibs A., Barashenkov V.S. [Ed.] *Kvantovaya mekhanika i integraly po trayektoriyam* [Quantum mechanics and path integrals], Moscow: Mir, 1968, 382 p. (In Russ.)

4. Rayzer Yu.P. *Fizika gazovogo razryada* [Physics of the gas discharge], Dolgoprudny: Intellekt, 2009, 736 p. (In Russ.)

5. Barshutina M.N., Barshutin S.N., Ushakov A.V. [Investigation of the electrical properties of polymeric dielectric arrays with nanostructured objects], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2014, no. S (52), pp. 16-19. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Chernyshova T.I., Kamenskaya M.A. [Information and analytical system for assessing and predicting the metrological reliability of electronic measuring instruments], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2014, no. S (52), pp. 111-114. (In Russ., abstract in Eng.)

Die Wirkung der thermoelektrischen Emission von Elektronen aus Kohlenstoffpartikeln auf den Grad der Ionisierung der Flamme

Zusammenfassung: Es sind die Ionisationsprozesse in einer Flamme untersucht. Insbesondere sind die Wirkung der thermoelektrischen Emission von Elektronen aus der festen Phase des Kohlenstoffs und mögliche physikalische und mathematische Modelle, die diesen Prozess beschreiben, betrachtet. Ein Modell der Flammenionisation ist entwickelt und der Beitrag der Thermoemissionselektronen zum Gesamtgrad der Flammenionisation ist bewertet worden.

Influence de l'émission thermoélectronique des particules de carbone sur le degré de l'ionisation de la flamme

Résumé: Sont étudiés les processus d'ionisation dans les flammes. En particulier, est examiné l'effet de l'émission thermoélectronique d'électrons à partir de la phase solide du carbone et des modèles physicomatématiques possibles décrivant ce processus. Est élaboré un modèle d'ionisation des flammes; est effectué l'évaluation de la contribution des électrons de thermoémission au degré général d'ionisation des flammes.

Авторы: *Баршутин Сергей Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и теплотехника»; *Мешкова Эльвира Алексеевна* – студент, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Фролов Сергей Владимирович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Биомедицинская техника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

МОДИФИЦИРОВАНИЕ КОМПОЗИТОВ СТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ

Ю. Н. Толчков, З. А. Михалева, А. Г. Ткачев

*Кафедра «Техника и технологии производства нанопродуктов»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; Tolschkow@mail.ru*

Ключевые слова: кинетика гидратации цемента; наномодификатор; рентгенофазовый анализ; углеродные нанотрубки; цементный камень.

Аннотация: Рассмотрены возможности применения углеродных нанотрубок в качестве модифицирующей комплексной нанодобавки. Исследованы основные прочностные характеристики цементного камня. Рост прочностных характеристик цементного камня при внедрении наномодификатора подтверждается ускоренным процессом гидратации цемента и изменением микроструктуры цементного камня. По данным рентгенофазового анализа в первоначальные сроки твердения происходит образование дополнительных низкоосновных гидросиликатов группы тоберморита. Результаты сканирующей электронной микроскопии подтвердили формирование направленной кристаллизации частиц новообразований цементного камня преимущественно с контактами срастания. Предел прочности наномодифицированных образцов при сжатии увеличивается на 20 – 30 % в возрасте 28 суток.

Введение

Получение композитов строительного назначения с заданными технологическими параметрами зависит от определенных факторов: типа и характеристики минерального вяжущего вещества (химического и минералогического составов, тонкости помола, наличия различных добавок в составе); заданных назначений отношения вода/цемент (**В/Ц**); дополнительной механо-химической активации цемента; условий и режимов перемешивания; температурных и влажностных условий твердения; введения специальных добавок в бетонную смесь, в том числе проявляющих свое действие на микро- и наноструктурных уровнях цементного камня и бетона [1].

В последнее время наблюдаются существенные изменения в технологиях строительных материалов. Рассматриваются их дополнительные свойства на разных размерных уровнях; появились новые виды композитов – высокотехнологичные, высокопрочные, малоусадочные; рассматриваются подходы для направленного изменения свойств. Параллельно с изменением подходов и развитием строительных материалов дополнительное совершенствование получили новые классы добавок. Отличительная особенность таких веществ заключается в существенном влиянии на определяющие глубинные параметры и механизмы структурообразования. К наиболее востребованным и перспективным материалам относятся нанодобавки или наномодификаторы [2]. Модифицирование композитов с примени-

ем различных наномодификаторов, в том числе углеродсодержащих, является перспективным, поскольку их введение заметно улучшает физико-механические характеристики при малых дозировках добавок и позволяет направленно регулировать структуру материала путем проявления различных эффектов [2 – 5]. Между тем значительные показатели поверхностной энергии наночастиц существенно препятствуют их использованию в качестве компонентов наномодификатора, так как они могут быть склонны к агломерации. Размер агломератов может достигать микрометровых масштабов. Основные подходы при наномодифицировании композитов реализуются двумя основными способами: в первом варианте наноструктуры заданных параметров и размеров предварительно синтезируются, после чего синтезируемый материал при соблюдении определенных технологических подходов вносится в требуемый материал; во втором – в системе реализуется направленный синтез наночастиц, за счет чего происходит наномодифицирование структуры материала. При первом варианте предварительно синтезированные наноструктуры (например, сухая смесь компонентов) дополнительно обрабатывают перед процедурой введения в структуру композита, так наиболее распространенным способом является получение водной суспензии на их основе. При использовании второго способа существенные трудности при внесении наномодификатора и его равномерного распределения максимально минимизированы.

Рассмотренные работы [4, 5] по наномодифицированию строительных композитов фиксируют положительные изменения структуры, например, углеродные нанодобавки позволяют существенно увеличить значения физико-механических показателей. Эти изменения достигнуты благодаря формированию в наномодифицированных образцах менее пористой структуры и увеличенного количества образовавшихся гидросиликатов кальция по сравнению с немодифицированными составами.

Коллоидная система «вода – углеродные нанотрубки» является эффективным инструментом передачи высоких механических характеристик и свободных химических связей углеродного наноматериала, благодаря чему осуществляется лучшее сцепление составных компонентов композита и, как следствие, выполняется рост предела прочности строительного материала. Вопросы влияния воды затворения, структурированной фуллероидными наночастицами, рассмотрены в работе [6]. Установлено влияние наноструктурированной воды затворения, что приводит к снижению вязкости цементного теста в 1,4 – 1,7 раза. Результаты указывают на значительное качественное повышение показателей удобоукладываемости, сохраняемости заданной подвижности при сохранении заданного расхода цемента или его сокращении.

Математические подходы по оценке свойств наномодифицированных композитов рассмотрены в исследованиях [7, 8]. С помощью предложенных моделей оценивались изменения и влияние применяемых углеродных нанодобавок на прочностные показатели материала. При оценке микроструктуры наномодифицированных образцов установлено образование отдельных кристаллитов гидросиликатов кальция, которые расположены в зоне близкого контакта углеродных наночастиц, что способствует заполнению микропустот и образованию единой мелкокристаллической структуры с пониженным напряжением срастания кристаллов. В работах определены зависимости, влияющие на агломерацию наночастиц в объеме структуры композита. Определяющим фактором оказалось значение длины углеродных нанотрубок (УНТ): при использовании более «коротких» скапливание наночастиц существенно не наблюдается или отсутствует.

Учеными из Санкт-Петербурга разработан модификатор на основе водорастворимого фуллерена, применение которого ориентировано на материалы строительного назначения [9, 10]. Модификатор обладает следующими свойствами: насыпная плотность 600...900 кг/м³, средний размер кластеров 300 нм. Примене-

ние наномодификатора оценивалось на цементных смесях (0,15 % от массы цемента). В результате у модифицированных образцов зафиксировано изменение подвижности в пределах П1...П5, прочностные показатели увеличились в пределах 25 – 40 %.

Анализ результатов исследования [11, 12] выявил рост физико-механических показателей образцов строительных композитов при использовании дисперсии полифункциональной добавки на основе многослойных УНТ в дозировке 0,006 % от вяжущего вещества (гипса, цемента), что способствует повышению прочности в ранние сроки твердения (7-е сутки) и составляет порядка 55 % в сравнении с контрольными составами.

Цель данной работы – изучение влияния УНТ как модифицирующей комплексной нанодобавки на кинетику гидратации цемента, фазовый состав и прочностные характеристики цементного камня.

Методы и материалы

В работе представлены экспериментальные данные, направленные на изучение и применение комплексной нанодобавки для модифицирования цементного камня и материалов строительного назначения. В качестве основного наномодифицирующего компонента добавки использовались углеродные наноматериалы (УНМ) серии «Таунит» (предприятие производитель – ООО «НаноТехЦентр», г. Тамбов). Многослойные трубки имеют в среднем наружный диаметр 40 нм, внутренний – 5 нм, плотность 560 кг/м³, средняя длина одиночных нанотрубок составляет 2 мкм. На рисунке 1 представлены изображения УНТ «Таунит», полученные с помощью сканирующей (СЭМ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

Рассматриваемый наномодификатор вносился в композит в виде коллоидной системы, получение дисперсии выполнено за счет ультразвуковой обработки УНТ в водной среде, содержащей поверхностно-активные вещества (ПАВ) – сурфактанты. Применение технологий получения коллоидных дисперсных систем является достаточно энергоэффективным методом наномодифицирования – снижаются затраты на синтез наночастиц, при правильно подобранных параметрах система остается устойчивой достаточно длительное время. Методика получения модифицирующих добавок и оптимальные рецептурные составы использовались на основе ранее разработанных параметров [13]. Воздействие ультразвука на систему проводили с помощью ультразвуковой установки серии ИЛ-100-6/4, оптимальное время диспергирования составило 20...30 минут, амплитуда колебаний на частоте

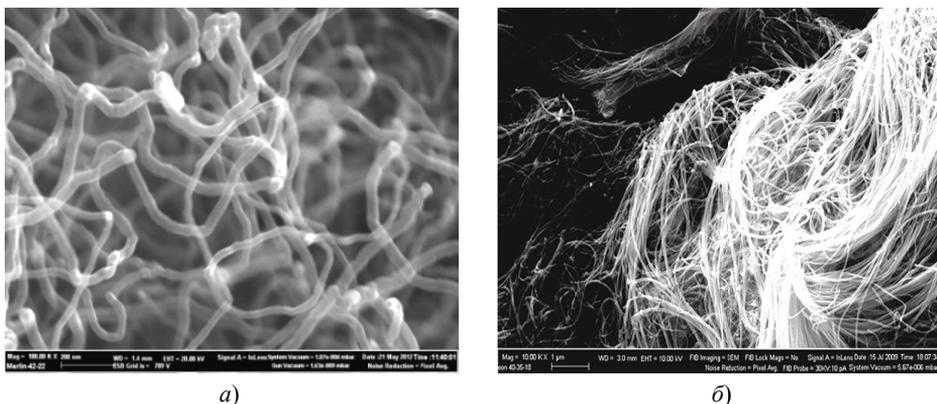


Рис. 1. СЭМ- (а) и ПЭМ-изображения (б) УНТ «Таунит»

Таким образом, решалась проблема равномерного распределения наноструктур в строительном композите. Предварительными экспериментальными исследованиями определена оптимальная концентрационная дозировка комплексной углеродной нанодобавки в составе цементных композиций, которая находится в интервале 0,0001 – 0,0007 % от массы цемента [15, 16], отвечает качественному изменению физико-механических показателей модифицированного композита и способствует получению седиментационно-устойчивой суспензии на основе УНТ с оптимальными параметрами использования и хранения (не более 3 суток). Сделано предположение, что наличие такого интервала в дозировке может быть связано с высокой химической активностью и большой реакционно-активной площадью поверхности углеродных наномодификаторов. При повышенной дозировке УНТ, вероятнее всего, создаются условия, при которых химически активные углеродные наноструктуры удерживают часть необходимой воды затворения. В таком случае возможно образование дефицита воды для протекания процессов гидратации минералов вяжущего материала.

Применяемые интервалы дозировок нанодобавок подтверждены в работах [17 – 20].

В экспериментальных исследованиях при получении цементного теста с В/Ц = 0,33 использовали портландцемент ЦЕМ I 42,5Н и названные нанодобавки с дозировкой 0,0006 %. Исследования параметров кинетики процесса гидратации цемента проводили при нормальных условиях с продолжительностью реализации процесса в течение 1, 3, 7, 14, 28 сут. Фазовый состав эталонного и наномодифицированного цементного камня контролировали рентгенодифрактометрическим методом (CuK_α -излучение, $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$, дифрактометр Bruker D2 Phaser); обработка дифрактометрических данных осуществлялась автоматически с использованием компьютерной программы PDWin 4.0. Степень гидратации рассчитывали [21] по формуле

$$C_h(\text{C}_3\text{S}) = \left(1 - \frac{I_{\text{mod}}}{I_0}\right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где I_{mod} – интенсивность дифракционного максимума при $d = 2,75 \text{ \AA}$ фазы $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S) образцов разного состава и различным срокам гидратации цемента; I_0 – интенсивность дифракционного максимума при $d = 2,75 \text{ \AA}$ фазы $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S) исходного цемента.

Предел прочности при сжатии цементного камня определяли через 1, 3, 7, 14, 28 суток твердения в «нормальных условиях»; испытания образцов размером $5 \times 5 \times 5$ см вели на испытательной системе ИП-500М-авто; для обеспечения статистической достоверности результатов физико-механических испытаний число образцов в сериях составляло 9 – 12. Определено, что внутрисерийный коэффициент изменчивости результатов оценки прочности не превышал 7 – 10 %.

Результаты и обсуждения

Полученные в ходе исследований данные показывают, что в системах, содержащих наномодифицирующие компоненты, процесс гидратации цемента существенно ускоряется (табл. 2): к суточной продолжительности твердения степень гидратации образцов достигает значений, близких к 50 %, в эталонных образцах сравнимые значения формируются к 28 суткам.

Результаты рентгенофазового анализа образцов цементного камня контрольного состава и модифицированных углеродным наномодификатором показали, что изменение соотношения интенсивностей пиков на дифрактограммах модифицированных образцов может быть связано с блокирующим действием наномоди-

**Степень гидратации цементного камня
при использовании наномодификаторов**

Название системы	Содержание УНТ в наномодификаторе, %	Степень гидратации, сутки				
		1	3	7	14	28
Ц – В	0	30,0	32,9	34,6	38,5	46,8
Ц – В – SMM	0,0006	53,9	59,2	65,2	63,5	64,0
Ц – В – SMTK		21,4	28,0	60,6	63,1	63,1
Ц – В – SM24		46,8	51,1	51,4	55,0	62,3

фикатора, при котором часть ионов кальция остается в растворе и не вступает в дальнейшее взаимодействие с другими веществами, что может привести к образованию более мелких кристаллов, закрывающих свободные поры цементного камня [22, 23]. Анализ результатов рентгенодифрактометрических исследований модифицированных образцов показал, что на всех рентгенограммах фиксируются фазы гидросиликатов кальция различного состава $((CaO)_x \cdot SiO_2 \cdot 8H_2O$, $2CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$, $CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$); при этом дифрактометрические пики являются более широкими, что может свидетельствовать об образовании мелкокристаллической структуры; с увеличением времени твердения фиксируется наличие фазы этtringита, это подтверждает влияние УНТ на морфологию получаемого цементного камня [24].

Исследование микроструктуры контрольных и наномодифицированных образцов мелкозернистого бетона проводили методом электронной микроскопии (рис. 3).

Установлено, что в модифицированном комплексном наномодификатором композите формируется увеличенное взаимодействие числа контактов срастания и направленная кристаллизация частиц новообразований.

Структура композита при использовании наномодификаторов на основе УНТ приобретает более плотную упаковку частиц, что позволяет сделать вывод о повышении физико-механических характеристик материала (рис. 4), в результате формирования упорядоченной структуры и новообразований с измененной морфологией кристаллогидратов. Это подтверждается наличием игольчатых кристаллов (размер отдельных кристаллов достигает 3...5 мкм), которые, предположительно, выполняют дискретное наноструктурирование цементных систем, соединяя новообразования в единый конгломерат и выполняя армирующую роль

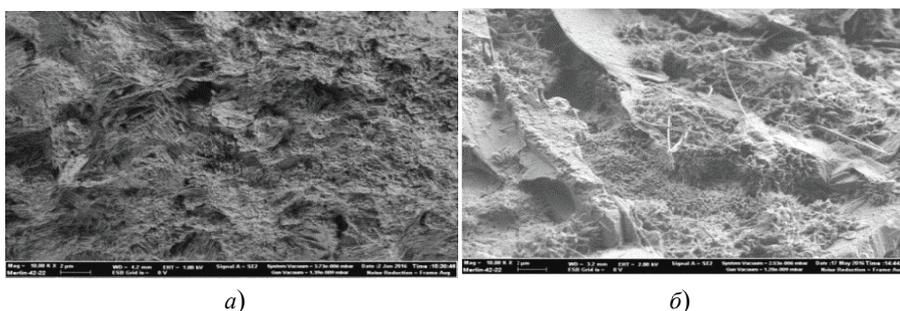


Рис. 3. Микроструктура наномодифицированного мелкозернистого бетона:
а – контрольный образец; б – наномодифицированный

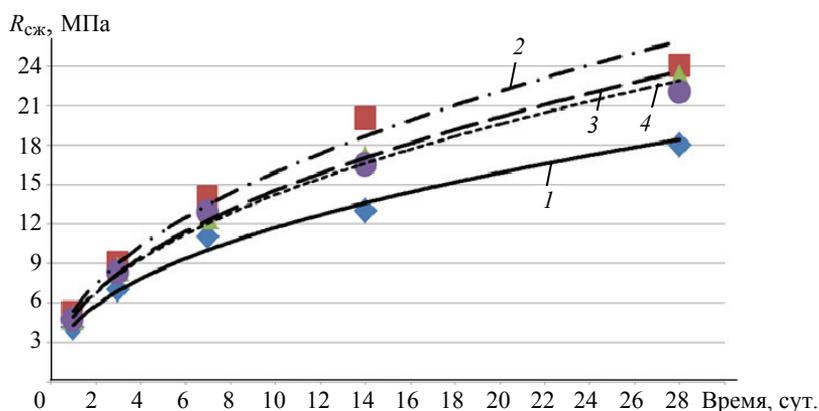


Рис. 4. Кинетика набора прочности цементного камня при использовании наномодификаторов:

1 – Ц – В; 2 – Ц – В – SM24; 3 – Ц – В – SMM; 4 – Ц – В – SMTK

в структуре бетона. При этом также наблюдается агломерация нанонаполнителя из множества наночастиц в виде сфер, что характеризует степень активности углеродных наночастиц и их поверхностных сил. Образование кристаллогидратов по поверхности УНТ приводит к формированию дополнительной надмолекулярной структуры, имеющей свою направленность и повторяющую поверхность нанотрубок с организацией собственной субструктуры [25, 26].

Все полученные наномодифицированные образцы показали прирост показателей удельной поверхности относительно контрольного состава на 30 – 50 %. Отметим, что значения удельной поверхности определяют, с одной стороны, дисперсность материала и геометрические характеристики поровых каналов, с другой, – эти факторы являются ключевыми элементами для формирования качественной и долговечной структуры материала.

При модифицировании структуры цементного камня нанодобавками, определяющим в эффективности данного процесса может быть не только изменение кинетики гидратации, но и изменение кинетики прочности (скорости набора прочности, продолжительности достижения «отпусковых» и достигаемых предельных значений прочности цементного камня). Проведенные исследования показывают ускорение набора прочности всех наномодифицированных образцов, а также повышение предела прочности на сжатие примерно на 20 – 30 %.

Заключение

Рассмотрено влияние комплексного наномодификатора на основе УНТ на кинетику гидратации цемента, фазовый состав и прочностные характеристики цементного камня.

Установлено, что при введении наномодификатора наблюдается ускорение процесса гидратации цемента с формированием оптимальной микроструктуры цементного камня. При этом методом сканирующей электронной микроскопии показано формирование дополнительной направленной кристаллизации частиц новообразований цементного камня преимущественно с контактами срастания.

По данным рентгенофазового анализа наблюдается изменение фазового состава наномодифицированных образцов, при этом уже в начальные сроки твердения происходит дополнительное образование низкоосновных гидросиликатов кальция.

Проведенные исследования кинетики набора прочности наномодифицированного цементного камня показывают повышение предела прочности на сжатие примерно на 20 – 30 % в возрасте 28 суток для всех образцов.

Список литературы

1. Артамонова, О. В. Концепции и основания технологий наномодифицирования структур строительных композитов. Часть 1 : общие проблемы фундаментальности, основные направления исследований и разработок / О. В. Артамонова, Е. М. Чернышов // *Строительные материалы*. – 2013. – № 9. – С. 82 – 95.
2. Чернышов, Е. М. Концепции и основания технологий наномодифицирования структур строительных композитов. Часть 3 : эффективное наномодифицирование систем твердения цемента и структуры цементного камня (критерии и условия) / Е. М. Чернышов, О. В. Артамонова, Г. С. Славчева // *Строит. материалы*. – 2015. – № 10. – С. 54 – 64.
3. Scrivener, K. L. Innovation in use and Research on Cementitious Material / K. L. Scrivener, R. J. Kirkpatrick // *Cement and Concrete Research*. – 2008. – No. 38 (2). – P. 128 – 136.
4. Konsta-Gdoutos, M. S. Highly Dispersed Carbon Nanotube Reinforced Cement Based Materials / M. S. Konsta-Gdoutos, Z. S. Metaxa, S. P. Shah // *Cement and Concrete Research*. – 2010. – Vol. 40. – P. 1052 – 1059.
5. Konsta-Gdoutos, M. S. Multi-Scale Mechanical and Fracture Characteristics and Early-age Strain Capacity of High Performance Carbon Nanotube/Cement Nanocomposites / M. S. Konsta-Gdoutos, Z. S. Metaxa, S. P. Shah // *Cement and Concrete Composites*. – 2010. – Vol. 32. – P. 110 – 115.
6. Pukhareno, Yu. Structural Features of Nanomodified Cement Stone / Yu. Pukhareno, I. Aubakirova, V. Staroverov // *Architecture and Engineering*. – 2016. – Vol. 1, No. 1. – P. 66 – 70.
7. Dispersion of Carbon Nanotubes and its Influence on the Mechanical Properties of the Cement Matrix / A. Sobolkina [et al.] // *Cement and Concrete Composites*. – 2012. – Vol. 34. – P. 1104 – 1113.
8. Smilauer, V. Micromechanical Analysis of Cement Paste with Carbon Nanotubes / V. Smilauer, P. Hlavacek, P. Padevet // *Acta Polytechnica*. – 2012. – Vol. 52. – P. 22 – 28.
9. Kiski S.S., Ponomarev A.N., Ageev I.V., Chang Cun Modification of the Fine – Aggregate Concrete by High Disperse Silica Fume and Carbon Nanoparticles Containing Modifiers / S. S. Kiski, A. N. Ponomarev, I. V. Ageev // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vols. 941 – 944. – P. 430 – 435.
10. On the Low-temperature Anomalies of Specific Heat in Disordered Carbon Nanotubes / A. N. Ponomarev [et al.] // *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*. – 2015. – Vol. 66. – P. 13 – 17.
11. Cement Based Foam Concrete Reinforced by Carbon Nanotubes / G. Yakovlev [et al.] // *Materials Science*. – 2006. – Vol. 12 (2). – P. 147 – 151.
12. Modification of Construction Materials with Multi-Walled Carbon Nanotubes / G. Yakovlev [et al.] // *Procedia Engineering*. – 2013. – Vol. 57. – P. 407 – 413. doi: 10.1016/j.proeng.2013.04.053.
13. Модифицирование строительных материалов углеродными нанотрубками: актуальные направления разработки промышленных технологий [Электронный ресурс] / Ю. Н. Толчков [и др.] // *Нанотехнологии в строительстве : научный интернет-журнал*. – 2012. – Т. 4, № 6. – С. 57 – 69. – Режим доступа : http://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild_6_2012_RUS.pdf (дата обращения: 23.08.2018).
14. Влияние поверхностно-активных веществ на распределение углеродных наноматериалов в водных дисперсиях при наномодифицировании строительных композитов / Ю. Н. Толчков [и др.] // *Химическая физика и мезоскопия*. – 2017. – Т. 19, № 2. – С. 292 – 298.

15. Толчков, Ю. Н. Разработка наномодифицирующих добавок на основе УНМ «Таунит» в строительные композиты / Ю. Н. Толчков, З. А. Михалева // Аспекты ноосферы безопасности в приоритетных направлениях деятельности человека : материалы II-й Междунар. кластер. науч.-практ. конф. – Тамбов, 2011. – С. 68 – 69.
16. Ультразвуковая обработка – эффективный метод диспергирования углеродных нанотрубок в объеме строительного композита / М. Г. Габидуллин [и др.] // Строит. материалы. – 2013. – № 3. – С. 57 – 59.
17. Староверов, В. Д. Влияние наноструктурированной воды затворения на свойства цементных композитов / В. Д. Староверов // Актуальные проблемы современного строительства : сб. материалов 60-й Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – СПб., 2007. – Ч. I. – С. 178 – 183.
18. Reconstruction of the "Phase Separation – Ordering" Type and Specific Heat in Carbon / A. N. Ponomarev [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2014. – Vol. 1623. – P. 503 – 506.
19. Староверов, В. Д. Научные основы применения углеродных наночастиц фуллероидного типа в цементных композитах [Электронный ресурс] / В. Д. Староверов, Ю. В. Пухаренко // Междунар. форум по нанотехнологиям, 6 – 8 октября 2009 г. : электрон. журн. – Режим доступа : <http://rusnanotech09.rusnanoforum.ru/Home.aspx>. (дата обращения: 18.07.2018).
20. Pukhareno, Yu. Structural Features of Nanommodified Cement Stone / Yu. Pukhareno, I. Aubakirova, V. Staroverov // Architecture and Engineering. – 2016. – Vol. 1, No. 1. – P. 66 – 70.
21. Пащенко, А. А. Теория цемента / А. А. Пащенко (под ред.). – Киев : Будівельник, 1991. – 168 с.
22. Influence of Carbon Nanotubes Structure on the Mechanical Behavior of Cement Composites / S. Musso [et al.] // Composites Science and Technology. – 2009. – Vol. 69, No. 11-12. – P. 1985 – 1990.
23. Структуризация цементных вяжущих матриц многослойными углеродными нанотрубками / Г. И. Яковлев [и др.] // Строит. материалы. – 2011. – № 11. – С. 22 – 24.
24. The Effect of a Carbon Nanotubes-Based Modifier on the Formation of the Cement Stone Structure / Yu. N. Tolchkov [et al.] // Advanced Materials and Technologies. – 2018. – No. 3. – P. 049 – 056. doi: 10.17277/amt.2018.03.pp.049-056
25. Modification of Gypsum Binders by Using Carbon Nanotubes and Mineral Additives / Y. Tokarev [et al.] // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 172. – P. 1161 – 1168.
26. Структурирование ангидритовой матрицы нанодисперсными модифицирующими добавками / И. С. Маева [и др.] // Строит. материалы. – 2009. – № 6. – С. 4 – 5.

Modifying Building Composites with Carbon Nanostructures

Yu. N. Tolchkov, Z. A. Mikhaleva, A. G. Tkachev

*Department of Engineering and Technology of Nanoproducts
TSTU, Tambov, Russia; Tolschkow@mail.ru*

Keywords: cement hydration kinetics; nano-modifier; X-ray phase analysis; carbon nanotubes; cement stone.

Abstract: The paper considers the possibility of using carbon nanotubes as modifying complex nanoadditives to improve the basic strength characteristics of a cement stone. The introduction of a nanomodifier has an effect on the growth of the strength characteristics of cement stone, which is confirmed by the accelerated process of cement hydration and a change in the microstructure of the cement stone. According to X-ray phase analysis, in the initial periods of hardening, additional low-basic hydrosilicates of the tobermorite group are formed. The results of scanning electron microscopy confirmed the formation of directional solidification of cement stone neoplasm particles mainly with intergrowth contacts. The compressive strength of nanomodified samples increases by 20–30% at the age of 28 days.

References

1. Artamonova O.V., Chernyshov E.M. [Concepts and Foundations of Technologies for Nanomodifying Structures of Construction Composite Structures. Part 1: General Problems of fundamentality, Main Directions of Research and Development], *Stroitelnye materialy* [Construction Materials], 2013, no. 9, pp. 82-95 (In Russ.)
2. Chernyshov E.M., Artamonova O.V., Slavcheva G.S. [Concepts and Foundations of Technologies for Nanomodifying Structures of Construction Composite Structures. Part 3: Efficient Nanomodification of Cement Hardening Systems and Cement Stone Structure (Criteria and Conditions)], *Stroitelnye materialy* [Construction Materials], 2015, no. 10, pp. 54-64 (In Russ.)
3. Scrivener K.L., Kirkpatrick R.J. Innovation in use and Research on Cementitious Material, *Cement and Concrete Research*, 2008, vol. 38 (2), pp. 128-136.
4. Konsta-Gdoutos M.S., Metaxa Z.S., Shah S.P. Highly Dispersed Carbon Nanotube Reinforced Cement Based Materials, *Cement and Concrete Research*, 2010, vol. 40, pp. 1052-1059.
5. Konsta-Gdoutos M.S., Metaxa Z.S., Shah S.P. Multi-Scale Mechanical and Fracture Characteristics and Early-Age Strain Capacity of High Performance Carbon Nanotube/Cement Nanocomposites, *Cement and Concrete Composites*, 2010, vol. 32, pp. 110-115.
6. Pukharens Yu., Aubakirova I., Staroverov V. Structural Features of Nanomodified Cement Stone, *Architecture and Engineering*, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 66-70.
7. Sobolkina A., Mechtcherine V., Khavrus V., Maier D, Mende M., Ritschel M., Leonhardt A. Dispersion of Carbon Nanotubes and its Influence on the Mechanical Properties of the Cement Matrix, *Cement and Concrete Composites*, 2012, vol. 34, pp. 1104-1113.
8. Smilauer V., Hlavacek P., Padevet P. Micromechanical Analysis of Cement Paste with Carbon Nanotubes, *Acta Polytechnica*, 2012, vol. 52, pp. 22-28.
9. Kiski S.S., Ponomarev A.N., Ageev I.V. Chang Cun Modification of the Fine – Aggregate Concrete by High Disperse Silica Fume and Carbon Nanoparticles Containing Modifiers, *Advanced Materials Research*, 2014, vols. 941-944, pp. 430-435.
10. Ponomarev A.N., Egorushkin V.E., Melnikova N.V., Bobenko N.G. On the Low-Temperature Anomalies of Specific Heat in Disordered Carbon Nanotubes, *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2015, vol. 66, pp. 13-17.
11. Yakovlev G., Keriene J., Gailius A., Girmiene I. Cement Based Foam Concrete Reinforced by Carbon Nanotubes, *Materials Science*, 2006, vol. 12 (2), pp. 147-151.
12. Yakovlev G., Pervushin G., Maeva I., Keriene Ja., Pudov I., Shaybadullina A., Buryanov A., Korzhenko A., Senkov S. Modification of Construction Materials with Multi-Walled Carbon Nanotubes, *Procedia Engineering*, 2013, vol. 57, pp. 407-413, doi: 10.1016/j.proeng.2013.04.053
13. http://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild_6_2012_RUS.pdf (accessed 23 August 2018).
14. Tolchikov Yu.N., Panina T.I., Mikhaleva Z.A., Galunin E.V. Memetov N.R., Tkachev A.G. [The Effect of Surfactants on the Distribution of Carbon Nanomaterials

in Aqueous Dispersions During Nanomodification of Construction Composites], *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2017, vol. 19, no. 2, pp. 292-298 (In Russ.)

15. Tolchkov Yu.N., Mikhaleva Z.A. [Development of Nanomodifying Additives Based on CNM “TAUNIT” in Construction Composites], *Aspekty noosferoy bezopasnosti v prioritnykh napravleniyakh deyatel'nosti cheloveka: materialy II-oy mezhdunarodnoy klasternoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Aspects of Noospheric Security in the Priority Areas of Human Activities: Materials of the 2-nd International. Cluster Scientific-Practical Conference], Tambov, 2011, pp. 68-69 (In Russ.)

16. Gabidullin M.G., Zhuzin A.F., Rakhimov R.Z., Tkachev A.G., Mikhaleva Z.A., Tolchkov Yu.N. [Ultrasonic Treatment – An Effective Method of Dispersing Carbon Nanotubes in the Bulk of a Construction Composite], *Stroitelnye materialy* [Construction Materials], 2013, no. 3, pp. 57-59 (In Russ.)

17. Staroverov V.D. [The Effect of Nanostructured Mixing Water on the Properties of Cement Composites], *Aktual'nyye problemy sovremennogo stroitel'stva: sbornik materialov 60-y Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh* [Actual Issues of Modern Construction: Materials of the 60-th Scientific-Technical Conference of Young Researchers], St. Petersburg, 2007, part. I, pp. 178-183 (In Russ.)

18. Ponomarev A.N., Egorushkin V.E., Melnikova N.V., Bobenko N.G. Reconstruction of the “Phase Separation – Ordering” Type and Specific Heat in Carbon, *AIP Conference Proceedings*, 2014, vol. 1623, pp. 503-506.

19. <http://rusnanotech09.rusnanoforum.com/Home.aspx>. (accessed 18 July 2018).

20. Pukhareno Yu., Aubakirova I., Staroverov V. Structural Features of Nano-modified Cement Stone, *Architecture and Engineering*, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 66-70.

21. Paschenko A.A. (Ed.). *Teoriya tsementa* [The Theory of Cement], Kiev: Budivel'nik, 1991, 168 p. (In Russ.)

22. Musso S., Tulliani J.-M., Ferro G., Taglia-ferro A. Influence of Carbon Nanotubes Structure on the Mechanical Behavior of Cement Composites, *Composites Science and Technology*, 2009, vol. 69, no. 11-12, pp. 1985-1990.

23. Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Pudov I.A., Dulesova I.A., Bur'yanov A.F., Saber M. [Structurization of Cement Binding Matrices by Multilayer Carbon Nanotubes], *Stroitel'nyye materialy* [Building Materials], 2011, no. 11, pp. 22-24. (In Russ.)

24. Tolchkov Yu.N., Mikhaleva Z.A., Tkachev A.G., Artamonova O.V., Kashirin M.A., Auad M.S., The Effect of a Carbon Nanotubes-Based Modifier on the Formation of the Cement Stone Structure, *Advanced Materials and Technologies*, 2018, no. 3, pp. 049-056, doi: 10.17277/amt.2018.03.pp.049-056 (In Eng., abstract in Russ.)

25. Tokarev Y., Ginchitsky E., Sychugov S., Krutikov V., Yakovlev G., Buryanov A., Senkov S. Modification of Gypsum Binders by Using Carbon Nanotubes and Mineral Additives, *Procedia Engineering*, 2017, vol. 172, pp. 1161-1168.

26. Mayeva I.S., Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Bur'yanov A.F., Pustovgar A.P. [Structuring Anhydrite Matrix Nanodispersed Modifying Additives], *Stroitel'nyye materialy* [Construction materials], 2009, no. 6, pp. 4-5. (In Russ.)

Modifizieren der Verbundwerkstoffe für Bauzwecke durch Kohlenstoffnanostrukturen

Zusammenfassung: In dem Artikel wird die Möglichkeit der Verwendung von Kohlenstoffnanoröhren als modifizierenden komplexen Nanozusatz in Bezug auf die grundlegenden Festigkeitseigenschaften eines Zementsteins in Betracht gezogen. Das

Wachstum der Festigkeitseigenschaften von Zementstein mit der Einführung eines Nanomodifikators wird durch den beschleunigten Prozess der Zementhydratation und die Veränderung der Mikrostruktur des Zementsteins bestätigt, wobei die Röntgenphasenanalyse in den Anfangsperioden der Härtung die Bildung von zusätzlichen Hydrosilikaten der Tobermorite-Gruppe mit niedrigem Grundgehalt bewirkt. Die Ergebnisse der Rasterelektronenmikroskopie bestätigten die Bildung einer gerichteten Erstarrung von Zementstein-Neoplasmapartikeln, die hauptsächlich mit Kontaktwachsen miteinander verbunden sind. Die Druckfestigkeitsgrenze von nanomodifizierten Proben bei der Kompression steigt pro 28 Tage um 20–30%.

Modification des composites de la destination de construction par les nanostructures de carbone

Résumé: Sont examinées les possibilités de l'utilisation des nanotubes de carbone en tant que supplement complexe de modification sur les caractéristiques principales de la résistance de la pierre de ciment. La croissance des caractéristiques de la pierre de ciment lors de l'introduction du nanomodificateur est confirmée par le processus rapide d'hydratation du ciment et la modification de la microstructure de la pierre de ciment, selon l'analyse par rayons X dans le temps de durcissement initial. Les résultats de la micro-copie électronique de balayage ont confirmé la formation d'une cristallisation directionnelle des particules formées de la pierre de ciment, principalement avec les contacts de germination. La résistance à la compression des échantillons nanomodifiés augmente de 20 à 30% à l'âge de 28 jours.

Авторы: *Толчков Юрий Николаевич* – аспирант кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов»; *Михалева Зоя Алексеевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов»; *Ткачев Алексей Григорьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

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

**Мокрозуб Владимир Григорьевич
Mokrozub Vladimir**

Профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов.

24 мая 2018 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.07 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Методология информационной поддержки принятия решений при разработке технологических аппаратов многоассортиментных химических производств» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (информационные технологии).



Работа выполнена в ФГБОУ «ТГТУ» на кафедре «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении».

Научный консультант – заслуженный деятель науки РФ, д-р техн. наук, профессор Е. Н. Малыгин.

В диссертации разработана методология создания системы информационной поддержки принятия решений при разработке технологических аппаратов, отличающаяся: 1) оригинальной декомпозицией глобальной задачи аппаратурного оформления многоассортиментных химических производств на иерархическую систему связанных локальных задач, особенностью которой является классификация элементов технологических аппаратов на основные и вспомогательные; 2) формализованной постановкой многокритериальной оптимизационной задачи построения системы информационной поддержки принятия решений при разработке технологических аппаратов; 3) технологией разработки информационных моделей для локальных задач разработки технологических аппаратов; 4) методом хранения групповых спецификаций изделий, в котором принадлежность элементов сборочным единицам задается с помощью алгебры логики; 5) методом хранения спецификаций изделий с взаимозаменяемыми элементами, в котором взаимозаменяемость элементов задается знаниями в виде продукционных правил; 6) использованием современных методов теории графов, основанных на предлагаемых в работе представлении и обработке в реляционной базе данных простых графов, гипер- и ультраграфов с ограничениями, в которых ограничения обеспечиваются доменной и ссылочной целостностью базы; 7) классификацией знаний, представленных продукционными правилами, по принципу их влияния на вершины и ребра гиперграфа структуры технологических аппаратов при решении задач структурного и параметрического синтеза.

Решением ВАК Минобрнауки России от 16 октября 2018 года № 215/нк Мокрозубу В. Г. присуждена ученая степень доктора технических наук.

Область научных исследований: интеллектуальные системы; автоматизированное проектирование технологического оборудования; хранение и обработка информации; управление предприятиями химического и машиностроительного профиля.

Абед Ахмед Хассан Абед

Аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

12 декабря 2018 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.05 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Информационно-управляющие системы повышения устойчивости функционирования подвижных ВЧ – ОВЧ радиостанций при воздействии помех» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы.

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент В. М. Жуков.

Работа выполнена на кафедре «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: помехоустойчивость и автоматизация систем радиосвязи.

Борисова Елена Михайловна

Старший преподаватель кафедры теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», г. Ижевск.

25 сентября 2018 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.06 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитила диссертацию на тему «Применение некоторых технологий высокоэнергетической обработки поверхности для повышения коррозионной стойкости металлических материалов» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.03 – Технология электрохимических процессов и защита от коррозии.

Научный руководитель – д-р хим. наук, профессор С. М. Решетников.

Работа выполнена на кафедре фундаментальной и прикладной химии ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет».

Область научных интересов: повышение коррозионной стойкости металлических материалов путем применения методов короткоимпульсного лазерного воздействия и ионной имплантации.

Власова Татьяна Алексеевна

Аспирант кафедры «История и философия» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

22 сентября 2018 года на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.169.03, созданного при ФГБОУ ВО «Липецкий государственный педагогический университет имени П. П. Семенова-Тян-Шанского», ФГБОУ ВО «ТГТУ», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», защитила диссертацию на тему «Состав комсомольских организаций и стиль внутрисоюзной деятельности в 1960-е годы» на соискание ученой степени кандидата исторических наук по специальности 07.00.02 – Отечественная история.

Научный руководитель – д-р ист. наук, профессор А. А. Слезин.

Работа выполнена на кафедре «История и философия» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: социально-политическая история; ювенальная история; методика преподавания.