

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

**ВЕСТНИК
Тамбовского
государственного
технического
университета**

***TRANSACTIONS
of the Tambov
State
Technical
University***

2020. Том 26. № 2.

**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	176
Муромцев Д. Ю., Попов С. В., Шамкин В. Н. Усовершенствование подсистемы обеспечения работоспособности средств защиты информации в системе мониторинга инцидентов информационной безопасности банка.....	176
Алексеев С. Ю., Захаров А. Ю. Структурно-параметрический синтез функциональных моделей изолирующих дыхательных аппаратов	188
Диго Г. Б., Диго Н. Б. Параметрическая коррекция при управлении надежностью технических систем.....	202
Павлов В. И., Артемова С. В., Дорохова Т. Ю., Аксенов В. В. Энергетические соотношения при действии активных помех на радиолокационные информационные системы подвижных объектов	211
Немтинов В. А., Бобылев В. Ю., Немтинова Ю. В., Борисенко А. Б. Информационная поддержка принятия решений при проведении технологического обслуживания токарных станков	220
Алгазин Е. И. Оценка устойчивости состояния линейных систем автоматике	230
Мамедов Дж. Ф., Нариманова Р. О. Разработка интеллектуальной системы полива для выращивания чайной плантации	234
Процессы и аппараты химических и других производств. Химия	243
Промтов М. А., Гатапова Н. Ц., Борщев В. Я., Колиух А. Н., Степанов А. Ю., Шеина О. А. Влияние гидроимпульсной обработки на реологические параметры нефти	243
Кошелева М. К., Цинцадзе М. З. Влияние физических полей на кинетические коэффициенты в процессе экстрагирования технологических загрязнений из волокнистых материалов (<i>на английском языке</i>).....	254
Борщев В. Я., Пронин В. А. О влиянии режимных и конструктивных параметров барабанного гранулятора-сушиллки на фракционный состав продукта	262
Коновалов Д. Н., Лазарев С. И., Ковалев С. В., Луа П., Горелова Е. И., Ковалева О. А., Михайлин М. И., Левин А. А. Экспериментальные исследования кинетических характеристик нанопермембран при разделении промышленных растворов процесса цинкования и производства нитрата аммония	270

CONTENTS

Automation. Information Technology.	
Control. Instruments.....	176
Muromtsev D. Yu., Popov S. V., Shamkin V. N. Improvement of the Information Security Subsystem in the Bank Information Security Monitoring System.....	176
Alekseev S. Yu., Zakharov A. Yu. Structural and Parametric Synthesis of Functional Models of Self-Contained Breathing Apparatus.....	188
Digo G. B., Digo N. B. Parametric Correction for Reliability Management of Technical Systems.....	202
Pavlov V. I., Artemova S. V., Dorokhova T. Yu., Aksenov V. V. Energy Relations under the Active Interference on the Radar Information Systems of Moving Objects.....	211
Nemtinov V. A., Bobylev V. Yu., Nemtinova Yu. V., Borisenko A. B. Information Decision Making Support for Technological Maintenance of Lathes.....	220
Algazin E. I. Evaluation of Stability of the State of Linear Automation Systems.....	230
Mammadov J. F., Narimanova R. O. Development of Intellectual Irrigation System for Growing Tea Plantation	234
Chemical and Related Engineering.	
Chemistry.....	243
Promptov M. A., Gatapova N. Z., Borschev V. Ya., Koliukh A. N., Stepanov A. Yu., Sheina O. A. The Influence of Hydropulse Processing on Rheological Oil Parameters.....	243
Kosheleva M. K., Tsintsadze M. Z. The Influence of Physical Fields on Kinetic Coefficients in the Process of Extractiing Contaminants from Fabric (<i>in English</i>).....	254
Borshchev V. Ya., Pronin V. A. The Influence of Mode and Design Parameters of the Drum Granulator-Dryer on the Fractional Composition of the Product	262
Konovalov D. N., Lazarev S. I., Kovalev S. V., Lua P., Gorelova E. I., Kovaleva O. A., Mikhailin M. I., Levin A. A. Experimental Studies of the Kinetic Characteristics of Nano-Filtration Membranes in Separation of Industrial Solutions of the Zinc Processing and Production of Ammonium Nitrate.....	270

Фролов В. А., Беляев П. С., Макеев П. В., Беляев В. П., Шашков И. В. Взаимодействие компонентов модифицирующей добавки в процессе получения полимерно-битумного вяжущего.....	284
Аль Фадхли К. Х., Балобаева Н. Н., Леонтьева А. И., Брянкин К. В. Разделение эмульсии «вода – высокомолекулярные углеводороды» с использованием деэмульгатора природного происхождения	293
Рухов А. В., Туголуков Е. Н., Аль-Шариф А. Дж. Исследование теплоотдачи наномодифицированных жидкостей	300
Математика. Физика	306
Куликов Г. М., Меркушева Н. П., Куликов М. Г., Плотникова С. В. Связанный термоэлектромеханический анализ гибридных слоистых цилиндрических оболочек с пьезоэлектрическими сенсорами и актуаторами (<i>на английском языке</i>)	306
Материаловедение. Нанотехнологии	323
Попова А. А., Шубин И. Н. Особенности поведения движущегося слоя нанодисперсного материала и их учет при проектировании технологического оборудования	323

Frolov V. A., Belyaev P. S., Makeev P. V., Belyaev V. P., Shashkov I. V. Interaction of the Components of the Modifying Additive in the Process of Producing a Polymeric-Bituminous Binder.....	284
Al Fadhli K. H., Balobaeva N. N., Leontieva A. I., Bryankin K. V. Separation of the “Water – High Molecular Weight Hydrocarbons” Emulsion Using the Natural Origin Demulsifier	293
Rukhov A. V., Tugolukov E. N., Al-Sharif A. J. The Research into Heat Transfer of Nanomodified Liquids	300
Mathematics. Physics	306
Kulikov G. M., Merkusheva N. P., Kulikov M. G., Plotnikova S. V. Coupled Thermo-Electro-Mechanical Analysis of Hybrid Layered Cylindrical Shells with Piezoelectric Sensors and Actuators (<i>in English</i>).....	306
Material Science. Nanotechnology	323
Popova A. A., Shubin I. N. Features of Behavior of Moving Layer of Nanodispersion Material and their Accounting when Designing Technological Equipment.....	323

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДСИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
РАБОТОСПОСОБНОСТИ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ
В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА ИНЦИДЕНТОВ
ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ БАНКА**

Д. Ю. Муромцев¹, С. В. Попов², В. Н. Шамкин¹

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» (1),
crems@mail.jesby.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия;
кафедра безопасности и информационных технологий (2), popovsvik@mpei.ru;
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
г. Москва, Россия*

Ключевые слова: блок оценки надежности; вероятности состояний функционирования; информационная безопасность; оценка работы; подсистема обеспечения работоспособности; средства защиты информации.

Аннотация: Дано описание подсистемы обеспечения работоспособности в системе мониторинга инцидентов информационной безопасности, в которую введен разработанный авторами блок оценки надежности средств защиты информации по данным текущей эксплуатации. Проведена оценка работы системы мониторинга до и после начала использования усовершенствованной подсистемы обеспечения работоспособности.

Аббревиатуры

АБ – администратор безопасности;	ИИБ – инцидент информационной безопасности;
АБС – автоматизированная банковская система;	ПАС – программно-аппаратное средство;
БД – база данных;	ПД – персональные данные;
БОНСЗИ – блок оценки надежности средств защиты информации;	ПОРС – подсистема обеспечения работоспособности СМИИБ;
БР – блок резервирования;	СЗИ – средство защиты информации;
БХДР – блок хранения данных резервирования;	СКА – средство контентного анализа;
ИБ – информационная безопасность;	СМИИБ – система мониторинга инцидентов информационной безопасности

Введение

В статье предлагается реализовать в системе мониторинга инцидентов информационной безопасности, входящей в АБС, приведенные ранее в [1 – 7] методики и алгоритмы.

Разрабатывается ПОРС, которая объединит уже существующие средства обеспечения работоспособности отдельных СЗИ и где будет использована идеология аналогов подобных подсистем в информационных системах других предметных областей. В создаваемую подсистему предлагается ввести отдельный блок, с помощью которого будут оперативно оцениваться вероятности состояний функционирования СЗИ по данным, регулярно обновляемым в процессе текущей эксплуатации СМИБ.

Для оценки работы усовершенствованной СМИБ необходимо вычислить и сравнить показатели, характеризующие выявление инцидентов информационной безопасности в АБС за некоторый промежуток времени до и после внедрения ПОРС.

Подсистема обеспечения работоспособности системы мониторинга

Одной из важнейших задач в СМИБ является поддержание работоспособности СЗИ, входящих в ее состав. В банках для осуществления контроля нормального функционирования отдельных компонентов СМИБ используются технические средства, а часть функций по контролю возлагается на администратора безопасности. Успешное выполнение данной задачи осложняется наличием большого количества СЗИ разных типов и недостаточностью объема нужной информации об их текущем функционировании, что затрудняет АБ своевременное получение необходимой информации в нужном объеме, а также ее последующий анализ и принятие, при необходимости, соответствующих мер по восстановлению работоспособности СЗИ.

В современных информационных системах используются автоматизированные средства, совокупность которых оформляется в виде отдельных подсистем обеспечения работоспособности, осуществляющих контроль нормального функционирования различных ПАС. К основным методам их работы относятся [8 – 16]:

- резервирование файлов конфигураций ПАС, позволяющее восстановить параметры функционирования в случае несанкционированного их изменения;
- мониторинг системных показателей ПАС: уровня использования ресурса центрального процессора; объемов используемой оперативной памяти, файлов подкачки, свободного дискового пространства; производительности локальной сети и др.;
- создание «снимков» параметров оптимально функционирующих ПАС и сравнение с ними реальных параметров;
- отслеживание критически важных процессов и служб, необходимых для функционирования ПАС;
- применение программного обеспечения, предназначенного для автоматического устранения нарушений работоспособности ПАС;
- анализ журналов работы компонентов ПАС на наличие записей об ошибках;
- применение средств активного обнаружения ошибок в программных средствах;
- мониторинг сетевой доступности ПАС.

В качестве примера можно назвать следующие системы: Zenoss, Nagios и Zabbix [14, 17, 18].

Применительно к работе СМИБ банков следует предложить дополнительно использовать следующие методы осуществления контроля работоспособности [8, 9, 11, 19]:

- проверка целостности информационных и функциональных ресурсов СЗИ, входящих в СМИБ;
- генерация событий-маркеров;
- различные проверки модулей хранения информации (базы знаний экспертов, данных событий и инцидентов ИБ).

На основе применения вышеперечисленных методов разрабатывается подсистема обеспечения работоспособности СМИБ, в которой также используются результаты, полученные авторами в [1 – 7].

На рисунке 1 представлена структурная схема ПОРС, в которую входят следующие компоненты:

- консоль, позволяющая осуществлять наблюдение за процессом работы ПОРС и управление им, которая может работать как вместе с центральной консолью мониторинга СМИБ (см. рис. в [1]), так и независимо, в случае ее недоступности (по различным причинам).

- блок оценки надежности средств защиты информации, выделенный серым цветом и являющийся принципиально новым блоком.

- блок резервирования, осуществляющий сбор и сохранение файлов настроек (параметров работы) СЗИ, а также создающий образы оптимально функционирующих средств.

- блок хранения данных резервирования, представляющий собой хранилище, в котором содержатся собранные БР данные.

- блок контроля целостности, контролирующий целостность файлов, ветвей реестра на удаленных узлах (рабочих станциях, серверах или СЗИ), содержимого оперативной памяти и БД [8].

- генератор событий-маркеров, совершающий с заданной периодичностью определенные действия, называемые событиями-маркерами [9], которые имитируют вредоносную деятельность, направленную на информационные ресурсы АБС.

- блок автоматической обработки событий, предназначенный для устранения в автоматическом режиме некоторых нарушений, возникающих в СМИБ.

- агенты, осуществляющие сбор необходимых для работы ПОРС данных со всех подключенных СЗИ.

Рассмотрим работу некоторых из вышеперечисленных компонентов.

В блоке резервирования осуществляется резервирование двух типов.

Резервирование конфигураций направлено на поддержание файлов настроек СЗИ в состоянии, определенном администратором. Оно проводится перед каждым внесением изменений в файлы настроек. Копии файлов отдельно взятого СЗИ

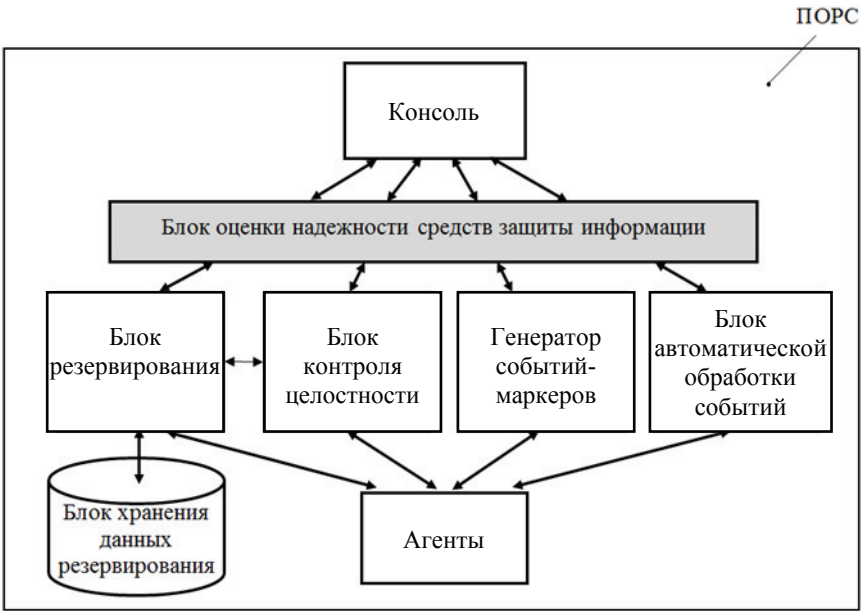


Рис. 1. Структурная схема подсистемы обеспечения работоспособности СМИБ

сохраняются в БХДР, причем последняя копия считается эталонной. Периодически файлы текущих настроек СЗИ сравниваются с эталонными на предмет наличия в них несанкционированных, то есть неподтвержденных администратором, изменений. Если такие изменения обнаруживаются, то файл текущих настроек автоматически заменяется эталонным. Во избежание замены эталонным файлом нового файла, санкционированного администратором, вводится процедура подписи файла настроек секретным ключом администратора.

Резервирование оптимально функционирующего средства заключается в создании образа (в полном копировании) внутренней памяти СЗИ или жесткого диска физического сервера, на котором данное СЗИ развернуто, а полученные образы сохраняются в БХДР. При этом во время такого резервирования по локальной сети банка передается значительный объем данных, что может нарушить работу как самой СМИБ, так и частично АБС. По этой причине все операции по созданию образов оптимально функционирующих средств проводятся в нерабочие часы.

В блоке хранения данных резервирования сохраняются полученные от БР данные двумя различными способами: в виде записей в БД и в виде файлов на жестких дисках физических серверов, взаимодействующих со СМИБ.

Блок контроля целостности сравнивает наборы текущих значений параметров конкретных СЗИ, которые могут (в зависимости от типа и модели СЗИ) содержаться в файлах, реестре, БД и т.д., с эталонными наборами значений параметров для этих СЗИ. Если наборы не отличаются, то это говорит о целостности параметров СЗИ, в противном случае – о произошедшем нарушении.

Генератор событий-маркеров проверяет, путем моделирования возможных атак на АБС, исправность СЗИ и их готовность обнаруживать и отражать данные атаки. Для различных СЗИ, входящих в состав СМИБ, используются разные события-маркеры. Например, для межсетевого экрана или средства обнаружения атак таким событием может являться сканирование с заданной периодичностью определенного сервера или рабочей станции в АБС, а для антивирусного программного обеспечения – имитация на сервере или рабочей станции действий, характерных для функционирования вредоносных программ.

Блок автоматической обработки событий содержит в себе библиотеку вполне определенных наборов команд (скриптов), которые выполняются в случае возникновения различных нарушений в работе отдельных компонентов СМИБ. Например, блок используется для удаленной перезагрузки/выключения сервиса или рабочей станции, автоматического запуска программного обеспечения, очистки места на жестком диске и т.д.

Блок оценки надежности средств защиты информации в системе мониторинга

С помощью блока оценки надежности средств защиты информации в системе мониторинга в ПОРС вычисляются значения вероятностей состояний функционирования СЗИ с использованием регулярно обновляемой (по данным текущей эксплуатации) информации о произошедших ранее нарушениях их работоспособности.

Схема информационного взаимодействия БОНСЗИ с ПОРС и СМИБ приведена на рис. 2, из которого также видна структура рассматриваемого блока.

Вычисление значений интересующих АБ стационарных и нестационарных вероятностей состояний функционирования осуществляется в модуле определения показателей надежности СЗИ, выделенном на рис. 2 серым цветом. Данный модуль является ключевым в составе БОНСЗИ, в его основе лежит разработанная авторами процедурная модель определения вероятностей состояний функционирования СЗИ.

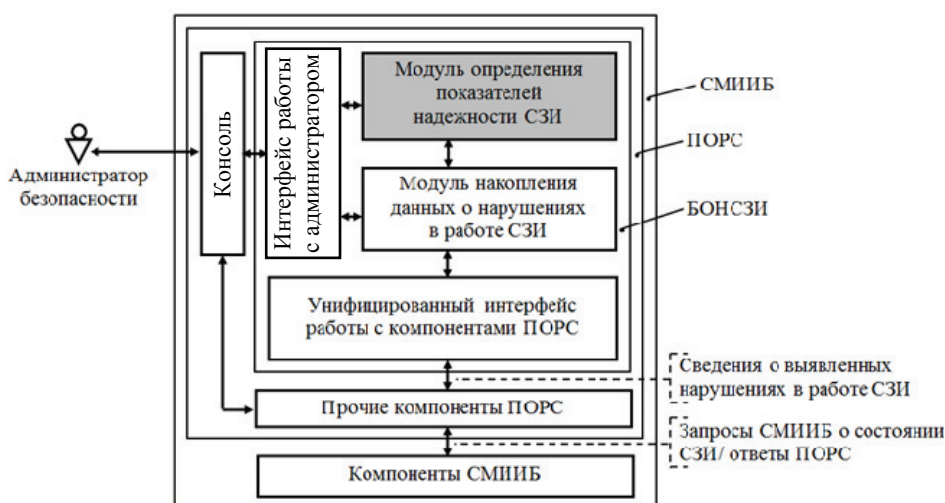


Рис. 2. Схема информационного взаимодействия БОНСЗИ с ПОРС и СМННБ

Унифицированный интерфейс работы с компонентами ПОРС предназначен для сопряжения БОНСЗИ с разнообразными ПОРС. Интерфейс работы с АБ предназначен для передачи команд управления, поступающих в БОНСЗИ от администратора; при ручном вводе данных о произошедших нарушениях в работе СЗИ (в случае, если нарушения не были зафиксированы ПОРС, но были обнаружены АБ); для корректировки уже сохраненных данных; для передачи администратору информации о состоянии надежности СЗИ.

В модуле накопления данных о нарушениях в работе СЗИ сохраняются сведения о произошедших ранее нарушениях работы СЗИ, входящих в состав СМННБ, которые поступают в БОНСЗИ от прочих компонентов ПОРС, представленных ранее на рис. 1, или вводятся вручную АБ.

Блок оценки надежности средств защиты информации автоматически анализирует журналы работы различных СЗИ, используя разработанную в [7] методику анализа, на предмет выявления имевших место нарушений функционирования дискретных и непрерывных СЗИ¹. Это позволяет за меньшее (по сравнению с ручным анализом администратора) время проводить исчерпывающее исследование журналов, получать достоверную информацию о текущем функционировании СЗИ и обрабатывать ее. В результате, по информации, извлекаемой из электронных журналов, можно оперативно определять различные характеристики надежности компонентов СЗИ, которые впоследствии необходимы при оценке надежности и эффективности функционирования данных СЗИ. Имеются в виду интегральные и дифференциальные функции распределения случайных времен работы и восстановления работоспособности компонентов; вероятности и плотности вероятностей их безотказной работы; вероятности отказа и восстановления; интенсивности отказов и восстановлений; числовые характеристики – средние времена работы и восстановления, их дисперсии и т.д.

Проведению первого подобного анализа предшествует, как правило, начальное обучение БОНСЗИ, состоящее в том, что АБ вносит в модуль определения показателей надежности СЗИ (см. рис. 2) следующую информацию: слова, слово-

¹СЗИ, с учетом фактора надежности, можно разделить на два вида: с непрерывным и дискретным временем работы. Данное обстоятельство определяет выбор математических методов, пригодных для исследования конкретных СЗИ с учетом нахождения в различных состояниях функционирования.

сочетания, последовательности записей и т.д., встречаемые в журналах различных СЗИ и соответствующие возникновению всевозможных нарушений в работе. В отдельных случаях БОНСЗИ изначально может содержать некоторый объем информации, необходимой для проведения анализа журналов работы.

Пересчет значений показателей надежности конкретного СЗИ осуществляется БОНСЗИ как в случае возникновения очередного нарушения в его работе, так и по расписанию при обновлении информации для всех СЗИ.

Чтобы БОНСЗИ начал в полном объеме выполнять свои функции следует затратить некоторое время для накопления в достаточном объеме необходимой информации о произошедших нарушениях в работе применяемых СЗИ (например, 2–3 года). В течение этого срока в состав СМИБ нежелательно вносить значительные изменения.

Благодаря наличию БОНСЗИ в ПОРС, администратор безопасности может оперативно получать информацию о текущей надежности СЗИ и прогнозировать ее на будущее, поэтому он более обоснованно, чем ранее, может принимать решения по обеспечению нормальной работы СМИБ.

Оценка работы системы мониторинга до и после применения усовершенствованной подсистемы обеспечения работоспособности

Рассуждения построены на примере одного из СЗИ дискретного типа, а именно средства контентного анализа, входящего в состав СМИБ, которое представляет собой программно-аппаратный комплекс, предназначенный для мониторинга сетевого трафика в целях выявления нарушений политики безопасности² [5]. Предполагается, что ПОРС отслеживает работоспособность только СКА, подверженного нарушениям в работе, а остальные СЗИ работают без нарушений. Сделать это возможно, поскольку СЗИ функционируют независимо друг от друга.

Сравнивалось количество ИИБ, выявленных СКА, на примере системы аудита файлов, копируемых на съемные носители, в течение года, предшествующего началу использования ПОРС, и последующего. До начала использования СКА в сутки в среднем выявляло 5 923 потенциальных события ИБ³, из которых 118 являлось инцидентами ИБ⁴. Другими словами, в среднем, примерно каждое пятидесятое событие, связанное с копированием информации на съемные носители, было потенциально опасным для банка, поскольку информация содержала конфиденциальные сведения. Соответственно, общее число ИИБ, выявленных СКА за 12 месяцев, составило 43 070.

Восстановление работы СКА после возникновения нарушения связано с его поиском и принятием мер по устранению.

Время, суммарно затраченное на восстановление работоспособности СКА по результатам расчета после обнаружения в журналах работы СКА ошибок нескольких видов, составило 4,19 суток.

Таким образом, СКА из 365 суток фактически функционировало 360,81 суток. Если разделить общее число выявленных за 12 месяцев ИИБ на это время,

²Выделяют несколько видов СКА [13]: различные системы аудита (почтовых сообщений; мгновенных сообщений; IP-телефонии; файлов, копируемых на съемные носители) и системы мониторинга Интернет-трафика.

³Событие информационной безопасности – это идентифицированное появление определенного состояния системы, сервиса или сети, которое свидетельствует либо о возможном нарушении политики ИБ банка или отказе защитных мер, либо о прежде неизвестной ситуации, которая может иметь отношение к безопасности.

⁴Инцидент информационной безопасности – это появление одного или нескольких нежелательных или неожиданных СИБ, с которыми связана значительная вероятность создания угрозы ИБ.

то получим среднесуточное число выявляемых ИИБ при отсутствии нарушений в работе компонентов СКА

$$43070 / 360,81 = 119,37.$$

Соответственно, если бы СКА в течение года работало безошибочно, то оно должно было выявить следующее число ИИБ

$$365 \cdot 119,37 \approx 43570.$$

Поскольку использование ПОРС значительно сокращает (практически исключает) время, связанное с поиском ошибок в работе СКА, то, естественно, сокращается и суммарное время, затрачиваемое на восстановление работоспособности СКА. Практически сразу ПОРС известит администратора о возникшем нарушении, который сразу может начать процесс устранения.

Как показали расчеты при использовании ПОРС в течение года суммарное время восстановления работоспособности СКА составит 5,124 ч или 0,21 суток.

За это время число ИИБ, пропущенных или обнаруженных со значительным опозданием из-за нарушений в работе СКА, равно

$$0,21 \cdot 119,37 = 25,07 \approx 25.$$

При этом необходимо отметить, что не только пропуск ИИБ, но и его выявление с задержкой, негативно влияют на состояние ИБ в банке. Если вследствие нарушения работы СКА, инцидент не был обнаружен при ближайшей проверке по расписанию, то автоматически он может быть обнаружен не ранее, чем через несколько часов при одной из следующих проверок⁵. При этом устранение негативных последствий, связанных с ним, может оказаться крайне затруднительным.

Всего за время наблюдения после внедрения ПОРС было бы выявлено следующее число инцидентов

$$43570 - 25 = 43545.$$

Таким образом, при использовании ПОРС увеличивается «производительность» СМИБ. За 12 месяцев наблюдения данный факт можно охарактеризовать следующим числом

$$(43545 - 43070) / 43070 = 0,011 \text{ или } 1,1 \, \%.$$

Проведя подобную оценку для каждого СЗИ, входящего в СМИБ, можно получить некоторое суммарное значение, характеризующее рост производительности СМИБ.

Целесообразность внедрения ПОРС в СМИБ можно оценить и по общей стоимости для банка выявленных с задержкой или не выявленных совсем ИИБ. Проиллюстрируем это также на примере СКА.

Стоимость одного ИИБ, выявляемого с помощью СКА, будем определять стоимостью для банка той информации, копирование которой вызвало возникновение этого ИИБ.

Предположим, что такой информацией являются персональные данные клиентов банка и его сотрудников. Тогда рассчитать стоимость одного ИИБ можно как произведение количества скопированных на съемный носитель записей ПД (то есть сведений об одном сотруднике или клиенте) на среднюю стоимость для банка одной такой записи.

⁵Особенностью некоторых СКА (в том числе, рассмотренного в работе) является то, что они выполняют свои функции периодически в соответствии с заданным администратором безопасности расписанием. Такой режим работы обусловлен необходимостью предварительного построения индекса или, иными словами, структуры данных, предназначенной для быстрого поиска нужной информации в перехваченных файлах.

Использовать для расчета необходимые статистические данные, взятые из конкретного банка, об имевших место ИИБ и количестве скопированных записей ПД, не представилось возможным, так как подобные сведения являются конфиденциальными. Поэтому в качестве возможного пути решения этой задачи выбрано использование внешних статистических данных. Однако в России отсутствует сколько-нибудь достоверная статистика о стоимости ПД и расходах, связанных с их раскрытием, поэтому пришлось обратиться к зарубежному опыту.

Среди публикаций, посвященных расчету стоимости утечек информации [20, 21], выделим [20], как одно из самых авторитетных и многократно цитируемых. В данной публикации собраны результаты исследований, проведенных в нескольких зарубежных странах⁶ в 2018 году.

Согласно [20], стоимость одной записи ПД для финансовых учреждений стран, участвовавших в исследовании, составила в среднем 206\$. Данная цифра получена с учетом всех прямых и косвенных расходов банков, к которым относятся следующие: обнаружение ИИБ, приведшего к утрате ПД; извещение клиентов, чьи записи были утрачены; выплата штрафов и компенсаций и т.д. Из представленных в работе данных можно получить, что в среднем за год на одну организацию-респондента приходилось по 24615 утраченных (утерянных или украденных) записей ПД.

Если предположить, что в банке за год будет утрачено упомянутое число записей ПД, то можно оценить среднее количество записей ПД, приходящееся на один ИИБ, выявляемый СКА до внедрения ПОРС

$$24615/43070 = 0,57.$$

Вычислив среднее число ИИБ, предотвращаемых в результате внедрения ПОРС в течение одного года,

$$43545 - 43070 \approx 475,$$

получим общее количество потенциально утрачиваемых за время нарушения функционирования СКА записей ПД

$$0,57 \cdot 475 = 271.$$

Умножив полученное число записей ПД на стоимость одной записи и на среднее значение курса доллара за 2018 год ($1\$ = 62,9 \text{ р.}$)⁷ можно оценить стоимость для банка информации, утечку которой удалось бы предотвратить в течение года после начала использования ПОРС в связи с улучшением работы СКА, р.,

$$271 \cdot 206 \cdot 62,9 = 3511455.$$

Имея в своем распоряжении необходимую информацию, можно провести подобные рассуждения для других основных СЗИ, входящих в состав СМИББ банка (антивирусное программное обеспечение, сканер безопасности, средство контроля портов ввода/вывода, межсетевой экран, система обнаружения атак [1, 2]), и получить оценку суммарной годовой выгоды для банка от использования ПОРС.

Отметим, что для оценки эффективности разработанного ПОРС также необходимо иметь сведения о затратах, связанных с выполнением исследовательских, проектных и внедренческих работ. Однако отсутствие таких сведений и ограниченный объем работы не позволили в настоящее время учесть данный фактор.

⁶В исследовании участвовали компании из США, Австралии, Великобритании, Германии, Франции, Бразилии, Японии, Италии, Индии, Объединенных Арабских Эмиратов и Саудовской Аравии.

⁷ Среднее значение курса доллара получено как среднее арифметическое от всех значений ежедневного курса доллара США по отношению к российскому рублю, установленных Центральным банком России в 2018 году.

Выводы

1. Усовершенствована структура подсистемы обеспечения работоспособности, являющейся составной частью системы мониторинга инцидентов информационной безопасности, за счет введения блока оценки надежности средств защиты информации. Благодаря этой операции становится возможным определять по данным текущей эксплуатации вероятности состояния функционирования средств защиты информации, смена которых обусловлена нарушениями их работоспособности или устранением таких нарушений, и которые позволяют администратору безопасности более обоснованно принимать решения, связанные с обеспечением информационной безопасности автоматизированной банковской системы.

2. Определена структура и характеристики работы блока БОНСЗИ, с помощью которого оцениваются вероятности состояний функционирования каждого из СЗИ, входящего в состав СМИБ, с использованием накапливаемых в процессе эксплуатации сведений о нарушениях в работе их компонентов.

3. Проведено, в качестве примера, сравнение результатов работы одного из СЗИ в составе СМИБ, а именно средства контентного анализа, по критерию среднегодового числа ИИБ, выявляемых системой мониторинга до и после начала использования усовершенствованной ПОРС. Показано увеличение числа ИИБ, выявленных СКА в течение года, на 1,1 %, что соответствует для банка предотвращению экономических потерь в размере 3,5 млн рублей в год.

4. Усовершенствование работы ПОРС в составе СМИБ позволило обеспечить более эффективный мониторинг инцидентов ИБ за счет повышения информированности администратора безопасности о текущем состоянии надежности средств защиты.

Список литературы

1. Попов, С. В. Факторы, влияющие на эффективность мониторинга инцидентов информационной безопасности в автоматизированной банковской системе / С. В. Попов, В. Н. Шамкин // Науч.-техн. вестн. Поволжья. – 2010. – № 1. – С. 145 – 148.

2. Попов, С. В. О влиянии состояний функционирования средств защиты информации на эффективность мониторинга инцидентов информационной безопасности банка / С. В. Попов, В. Н. Шамкин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 297 – 303.

3. Попов, С. В. Возможные состояния функционирования средств защиты информации в системе мониторинга инцидентов информационной безопасности / С. В. Попов, В. Н. Шамкин // Новые технологии и инновационные разработки : материалы 4-й Межвуз. науч.-практ. ежегодной конф., 13 мая 2011 г., Тамбов. – Тамбов, 2011. – С. 69 – 72.

4. Попов, С. В. Мониторинг состояний функционирования средств защиты информации в информационной системе / С. В. Попов, В. Н. Шамкин // Современные информационные технологии = «Contemporary Information Technologies» (Computer-Based Conference) : тр. Междунар. науч.-техн. конф., 2011 г., Пенза. – Пенза, 2011. – Вып. 13. – С. 165 – 168.

5. Попов, С. В. Определение вероятностей состояний функционирования средства контентного анализа как элемента системы мониторинга инцидентов информационной безопасности / С. В. Попов, В. Н. Шамкин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 1. – С. 27 – 37.

6. Попов, С. В. Алгоритм выявления инцидентов безопасности в информационной системе / С. В. Попов, В. Н. Шамкин // Всерос. науч. шк. «Актуальные проблемы нано- и микроэлектроники», 7–8 июля 2011 г., Тамбов. – Тамбов, 2011. – С. 223–224.

7. Попов, С. В. Методика мониторинга надежности показателей средств защиты информации в банке по данным их текущей эксплуатации / С. В. Попов, В. Н. Шамкин // *Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского*. – 2012. – № 1 (37). – С. 54 – 65.
8. Запечников, С. В. Контроль целостности функциональных ресурсов средств защиты информации в распределенной среде / С. В. Запечников // *Безопасность информационных технологий*. – 2009. – Т. 16, № 1. – С. 37 – 44.
9. Fry, Ch. Security Monitoring / Ch. Fry, M. Nystrom. – O'Reilly, 2009. – 227 p.
10. Карповский, Е. Я. Надежность программной продукции / Е. Я. Карповский, С. А. Чижов. – Киев : Техника, 1990. – 160 с.
11. Запечников, С. В. Контроль целостности информационных ресурсов при распределенном хранении данных / С. В. Запечников // *Безопасность информационных технологий*. – 2008. – Т. 15, № 2. – С. 86 – 91.
12. Палюх, Б. В. Надежность программных средств экономических информационных систем: учеб. пособие / Б. В. Палюх, В. К. Кемайкин, А. Д. Дорожкин. – Тверь : Тверской гос. техн. ун-т, 2008. – 128 с.
13. Сердюк, В. А. Новое в защите от взлома корпоративных систем / В. А. Сердюк. – М. : Техносфера, 2007. – 360 с.
14. Badger, M. Zenoss Core Network and System Monitoring / M. Badger. – Birmingham : Packt Publishing, 2008. – 261 p.
15. Hutton, N. Preparing for Security Event Management. – Текст : электронный / N. Hutton // *360 Information Security*. – URL : <http://www.windowsecurity.com/uplarticle/NetworkSecurity/360is-prep-sem.pdf> (дата обращения: 21.04.2020).
16. Swift, D. A Practical Application of SIM/SEM/SIEM Automating Threat Identification. – Текст : электронный / D. Swift // SANS Institute. – URL : http://www.sans.org/reading_room/whitepapers/logging/practical-application-sim-sem-siem-automating-threat-identification_1781 (дата обращения: 21.04.2020).
17. Kocjan, W. Learning Nagios 3.0 / W. Kocjan. – Packt Publishing, 2008. – 316 p.
18. Olups, R. Zabbix 1.8 Network Monitoring / R. Olups. – Packt Publishing, 2010. – 428 p.
19. Wotring, B. Host Integrity Monitoring: Best Practises for Deployment. – Текст : электронный ресурс / B. Wotring // *Security Focus*. – URL : <http://www.securityfocus.com/infocus/1771> (дата обращения: 21.04.2020).
20. Cost of Data Breach Study: Global Overview 2018. – Текст : электронный // IBM. – URL : <https://www.ibm.com/downloads/cas/861MNWN2> (дата обращения: 21.04.2020).
21. Data Breach Investigations Report 2019. – Текст : электронный // Verizon. – URL : <https://enterprise.verizon.com/resources/reports/2019-data-breach-investigations-report.pdf> (дата обращения: 21.04.2020).

Improvement of the Information Security Subsystem in the Bank Information Security Monitoring System

D. Yu. Muromtsev¹, S. V. Popov², V. N. Shamkin¹

*Department of Design of Electronic and Microprocessor Systems (1),
crems@mail.jesby.tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia;*

*Department of Security and Information Technology (2), popovsvik@mpei.ru;
National Research University "MPEI", Moscow, Russia*

Keywords: reliability assessment unit; probabilities of state of functioning; information security; performance appraisal; health subsystem; information security tools.

Abstract: The paper describes of the subsystem for ensuring operability in the information security incident monitoring system, into which the unit for assessing the reliability of information protection means according to the current operation developed by the authors is introduced. The performance of the monitoring system was assessed before and after the start of using the improved subsystem to ensure operability.

References

1. Popov S.V., Shamkin V.N. [Factors affecting the effectiveness of monitoring information security incidents in an automated banking system], *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzh'ya* [Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region], 2010, no. 1, pp. 145-148. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Popov S.V., Shamkin V.N. [On the influence of the functioning states of information security tools on the effectiveness of monitoring information security incidents in a bank], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 2, pp. 297-303. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Popov S.V., Shamkin V.N. *Novyye tekhnologii i innovatsionnyye razrabotki: materialy 4-y Mezhevuzovskoy nauchno-prakticheskoy yezhegodnoy konferentsii* [New technologies and innovative developments: materials of the 4th Interuniversity Scientific and Practical Annual Conference], 13 May, 2011, Tambov, 2011, pp. 69-72. (In Russ.)
4. Popov S.V., Shamkin V.N. *Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii = «Contemporary Information Technologies» (Computer-Based Conference)* [Modern Information Technologies = “Contemporary Information Technologies” (Computer-Based Conference)], Proceedings International scientific and technical conference, 2011, Penza, 2011, issue 13, pp. 165-168. (In Russ.)
5. Popov S.V., Shamkin V.N. [Determination of the probabilities of the state of functioning of the content analysis tool as an element of the information security incident monitoring system], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 1, pp. 27-37. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Popov S.V., Shamkin V.N. *Vserossiyskaya nauchnaya shkola «Aktual'nyye problemy nano- i mikroelektroniki»* [All-Russian Scientific School “Actual Problems of Nano- and Microelectronics”], 7-8 July, 2011, Tambov, 2011, pp. 223-224. (In Russ.)
7. Popov S.V., Shamkin V.N. [Methodology for monitoring the reliability of indicators of information security in the bank according to their current operation], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2012, no. 1 (37), pp. 54-65. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Zapechnikov S.V. [Integrity monitoring of the functional resources of information protection means in a distributed environment], *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy* [Security of information technologies], 2009, vol. 16, no. 1, pp. 37-44. (In Russ.)
9. Fry Ch. *Security Monitoring*, O'Reilly, 2009, 227 p.
10. Karpovskiy Ye.Ya., Chizhov S. A. *Nadezhnost' programmnoy produktsii* [Reliability of software products], Kiev: Tekhnika, 1990, 160 p. (In Russ.)
11. Zapechnikov S.V. [Control of the integrity of information resources during distributed data storage], *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy* [Security of information technologies], 2008, vol. 15, no. 2, pp. 86-91. (In Russ.)
12. Palyukh B.V., Kemaykin V.K., Dorozhkin A.D. *Nadezhnost' programmnykh sredstv ekonomicheskikh informatsionnykh sistem: uchebnoye posobiye* [Reliability of software tools of economic information systems: a training manual], Tver: Tverskoy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2008, 128 p. (In Russ.)

13. Serdyuk V.A. *Novoye v zashchite ot vzloma korporativnykh sistem* [New in protection against hacking of corporate systems], Moscow: Tekhnosfera, 2007, 360 p. (In Russ.)
 14. Badger M. *Zenoss Core Network and System Monitoring*, Birmingham: Packt Publishing, 2008, 261 p.
 15. <http://www.windowsecurity.com/uplarticle/NetworkSecurity/360is-prep-sem.pdf> (accessed 21 April 2020).
 16. http://www.sans.org/reading_room/whitepapers/logging/practical-application-sim-sem-siem-automating-threat-identification_1781 (accessed 21 April 2020).
 17. Kocjan W. *Learning Nagios 3.0*, Packt Publishing, 2008, 316 p.
 18. Olups R. *Zabbix 1.8 Network Monitoring*, Packt Publishing, 2010, 428 p.
 19. <http://www.securityfocus.com/infocus/1771> (accessed 21 April 2020).
 20. <https://www.ibm.com/downloads/cas/861MNWN2> (accessed 21 April 2020).
 21. <https://enterprise.verizon.com/resources/reports/2019-data-breach-investigations-report.pdf> (accessed 21 April 2020).
-

Verbesserung des Integritätssystems des Schutzes der Informationen im System der Überwachung der Vorfälle der Informationssicherheit bei der Bank

Zusammenfassung: Es ist die Beschreibung des Integritätssystems in dem System der Überwachung von Informationssicherheitsvorfällen, in das die von den Autoren entwickelte Einheit der Bewertung der Zuverlässigkeit der Mittel des Schutzes der Information gemäß dem aktuellen Betrieb eingeführt ist. Die Leistung des Überwachungssystems wurde vor und nach dem Beginn der Verwendung des verbesserten Subsystems bewertet, um die Funktionsfähigkeit sicherzustellen.

Perfectionnement du sous-système d'intégrité de la protection de l'information dans le système de surveillance des incidents de sécurité de l'information de la banque

Résumé: Est décrit le sous-système d'intégrité dans le système de surveillance des incidents de la sécurité de l'information, dans lequel est introduit une unité d'évaluation de la fiabilité des moyens de protection de l'information sur les données d'exploitation en cours élaborée par les auteurs. Le système de surveillance a été évalué avant et après l'utilisation du sous-système amélioré.

Авторы: *Муромцев Дмитрий Юрьевич* – доктор технических наук, профессор, проректор по научно-инновационной деятельности, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; *Попов Сергей Викторович* – кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности и информационных технологий Инженерно-экономического института, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия; *Шамкин Валерий Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Алексеев Владимир Витальевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и защита информации», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ИЗОЛИРУЮЩИХ ДЫХАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

С. Ю. Алексеев¹, А. Ю. Захаров²

*ОАО «Корпорация «Росхимзащита» (1); sergei.alexeev-dt@yandex.ru;
кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»,
kafedra@mail.gaps.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ» (2), г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: изолирующие дыхательные аппараты; система имитации процессов дыхания; структурно-параметрический синтез; тренажерные комплексы.

Аннотация: На основе анализа факторов, связанных с использованием дыхательного аппарата, и их влияния на человека поставлена задача структурно-параметрического синтеза функциональных моделей, решение которой обеспечило бы получение модели, воспроизводящей режимы работы дыхательного аппарата с заданной точностью, с учетом особенностей его конструкции и использования. Разработаны алгоритм решения сформулированной задачи, метод определения зависимостей изменения параметров работы дыхательного аппарата во времени, определены возможные варианты конструкции общих элементов.

Введение

При возникновении на производстве чрезвычайных ситуаций, сопровождающихся образованием непригодной для дыхания атмосферы, основным способом для обеспечения жизнедеятельности человека является применение дыхательных аппаратов. Универсальную защиту обеспечивают изолирующие дыхательные аппараты, которые применяются в условиях недостатка кислорода или при неизвестном составе загрязняющих воздух примесей. В этом случае человек и дыхательный аппарат образуют замкнутую систему, в которой режимы дыхания человека и работы аппарата взаимозависимы.

К достоинствам дыхательных аппаратов с химически связанным кислородом относятся высокое удельное время защитного действия, длительные гарантийные сроки хранения, возможность длительного пребывания в состоянии ожидания использования при минимальных проверках готовности, минимальные масса и габариты аппаратов, что обуславливает их широкое использование персоналом промышленных предприятий.

Эффективность использования дыхательного аппарата повышается при наличии у пользователей дополнительной информации об особенностях протекающих в нем процессов, навыков дыхания в аппарате и выполнения в нем действий в соответствии с планом ликвидации аварии. В условиях стресса, болевого и психологического шока, возникающих в условиях аварийной ситуации, сознание человека нестабильно, что затрудняет или делает невозможной правильную эксплуатацию дыхательного аппарата. Поэтому, важно обеспечить пользователя устойчивыми навыками, доведенными до автоматизма.

В настоящее время приобретение таких навыков осуществляется с помощью регенеративных тренажеров, представляющих собой полные функциональные модели дыхательных аппаратов с меньшим временем защитного действия. Они обеспечивают точное моделирование всего спектра воздействий, которые ощущает на себе человек при использовании дыхательного аппарата, но их применение сопряжено с большими экономическими затратами, связанными с утилизацией отработанного регенеративного продукта. Кроме того, они не позволяют оценить эффективность дыхания человека в дыхательном аппарате. Современный уровень развития средств вычислительной техники, мехатроники, цифровой обработки сигналов определяет возможность создания функциональных моделей дыхательных аппаратов, не использующих регенеративный кислородосодержащий продукт и выполняющих оценку эффективности дыхания человека в аппарате.

Ввиду многообразия конструкций дыхательных аппаратов с химически связанным кислородом, определяющегося широким их распространением на промышленных производствах, актуальной является задача разработки метода структурно-параметрического синтеза функциональных моделей дыхательных аппаратов, в которых использование регенеративного продукта заменено генерацией и обработкой информации о режимах дыхания человека и работы дыхательного аппарата.

Цель работы – разработка метода структурно-параметрического синтеза функциональных моделей дыхательных аппаратов для повышения точности моделирования их рабочих характеристик, сокращения экономических затрат и времени в процессах их проектирования.

Постановка задачи структурно-параметрического синтеза функциональных моделей

На основании проведенных исследований изменения характеристик определены основные факторы, связанные с режимами функционирования изолирующих дыхательных аппаратов (ИДА) и особенностями их конструкций, оказывающие влияние на человека. Среди определенных факторов выделены ключевые, реакция человека на которые напрямую влияет на эффективность работы ИДА, и на основе их анализа сформулированы требования к функциональным моделям изолирующих дыхательных аппаратов:

- обеспечивать воспроизведение зависимостей изменения сопротивления вдоху и выдоху во времени в зависимости от глубины, частоты дыхания, с заданной точностью соответствующих законам изменения сопротивления вдоху и выдоху дыхательного аппарата при равных значениях глубины и частоты дыхания;
- обеспечивать воспроизведение закона изменения температуры газовой дыхательной смеси (ГДС) во времени в зависимости от глубины, частоты дыхания, с заданной точностью соответствующего закону изменения температуры ГДС на выходе аппарата при равных значениях глубины и частоты дыхания;
- конструктивно внешне быть идентичной дыхательному аппарату.

Замена в функциональной модели регенеративного продукта средствами мехатроники и компьютерного моделирования определяет ее как программно-аппаратный комплекс. Функционирование модели обеспечивается за счет обработки информации о характеристиках процессов, протекающих в дыхательном аппарате и механике дыхания человека. На основе сформулированных требований разработана структурная схема модели (рис. 1).

Основными элементами структурной схемы являются два исполнительных устройства, обеспечивающих моделирование сопротивления дыханию и нагрев ГДС, а также устройство, обеспечивающее получение информации о режимах дыхания человека, обработка которой в процессе работы функциональной модели

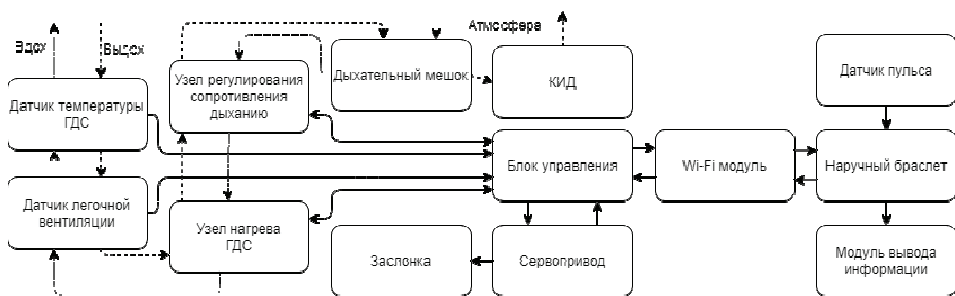


Рис. 1. Структурная схема функциональной модели дыхательного аппарата

дает возможность получения требуемых для текущего момента времени режимов ее работы. Алгоритм функционирования модели определяется потоками данных в ней (рис. 2).

Основной целью решения задачи структурно-параметрического синтеза функциональной модели в рамках определенных требований является получение такого варианта конструкции, который обеспечивал бы максимальную точность моделирования режимов работы ИДА. Для разработанной структурной схемы задача формулируется следующим образом:

– необходимо найти такие варианты конструкции подсистем нагрева ГДС, создания сопротивления дыханию и их взаимосвязей, при которых критерий (1) достигает минимума:

$$E(K, d_{inh}, d_{exh}, l_1, l_2, l_3) \rightarrow \min, \quad (1)$$

при ограничениях:

$$S(K) \leq S_t; \quad (2)$$

$$M(K, \{d_{inh}, d_{exh}, l_1, l_2, l_3\}) = M_d; \quad (3)$$

$$\bar{Q}(K, \{d_{inh}, d_{exh}, l_1, l_2, l_3\}) \leq \bar{Q}_r; \quad (4)$$

$$\bar{J}_d - \varepsilon \leq \bar{J}(K, \{K_1, K_2, \dots, K_m\}) \leq \bar{J}_d + \varepsilon, \quad (5)$$

где $M(K, \{d_{inh}, d_{exh}, l_1, l_2, l_3\})$, M_d – соответственно массы модели и моделируемого дыхательного аппарата; $S(K)$ – стоимость изготовления конструкции; $\bar{J}(K, \{K_1, K_2, \dots, K_m\})$, $\bar{J}_d$ – векторы геометрических параметров воздухопроводной системы модели и дыхательного аппарата соответственно; ε – допустимая величина отклонения показателя размера элемента воздухопроводной системы дыхательного аппарата при встраивании в него элемента модели; $\bar{Q}(K, \{d_{inh}, d_{exh}, l_1, l_2, l_3\})$, $\bar{Q}_r$ – векторы геометрических параметров обечаек

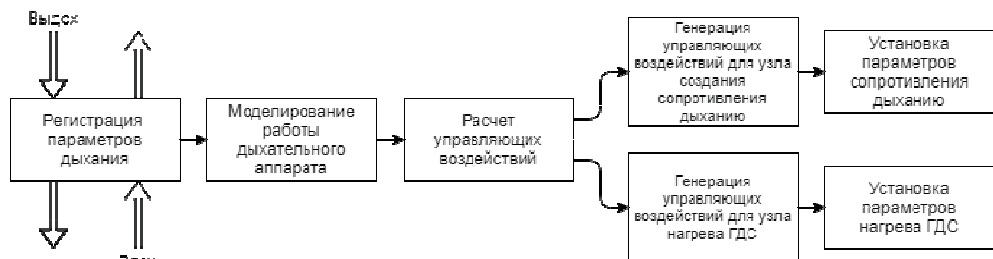


Рис. 2. Схема потоков данных функциональной модели

модели и дыхательного аппарата соответственно; d_{inh}, d_{exh} – соответственно диаметры трактов вдоха и выдоха модели, по которым движется ГДС; l_1, l_2, l_3 – определяющие размеры устройства, моделирующего нагрев газовой смеси;

$$E = \sum_{i=1}^n \frac{(T(\tau_j) - T_{s.4}(d_{inh}, l_1, l_2, l_3))^2}{(T_0 - T_1)^2} + \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta P_{inh.i}(\tau_j) - \Delta P_{s.inh.i}(d_{inh}, a_{inh.j}))^2}{(\Delta P_0 - \Delta P_1)^2} + \\ + \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta P_{exh.i}(\tau_j) - \Delta P_{s.exh.i}(d_{exh}, a_{exh.j}))^2}{(\Delta P_0 - \Delta P_1)^2}, \quad (6)$$

где $T(\tau_j), T_{s.4}(d_{inh}, l_1, l_2, l_3)$ – температуры вдыхаемой газовой смеси, поступающей на вдох соответственно из дыхательного аппарата и модели; $\Delta P_{inh.i}(\tau_j), \Delta P_{s.inh.i}(d_{inh}, a_{inh.j})$ – сопротивления вдоху, оказываемые соответственно дыхательным аппаратом и моделью; $\Delta P_{exh.i}(\tau_j), \Delta P_{s.exh.i}(d_{exh}, a_{exh.j})$ – сопротивления выдоху, оказываемые соответственно дыхательным аппаратом и моделью; τ_j – момент времени, для которого оценивается точность приближения показателей модели к показателям аппарата; $T_0, T_1, \Delta P_0, \Delta P_1$ – нижний и верхний пределы, в которых изменяются значения температуры и сопротивления дыханию (определяются индивидуально для каждого ИДА в зависимости от области его применения);

$$\Delta P_{s.inh.i}(d_{inh}, a_{inh.j}, l_1, l_2, l_3) = \Delta P_{s.inh.i}(d_{inh}, a_{inh.j}) + \Delta P_{inh.pipe.1}(d_{inh}) + \\ + \Delta P_{pipe.2} + \Delta P_{heat}(d_{inh}, l_1, l_2, l_3); \quad (7)$$

$$\Delta P_{s.exh.i}(d_{exh}, a_{exh.j}) = \Delta P_{exh.i}(d_{exh}, a_{exh.j}) + \Delta P_{exh.pipe.1}(d_{exh}) + \Delta P_{pipe.2}, \quad (8)$$

где $\Delta P_{inh.pipe.1}(d_{inh}), \Delta P_{exh.pipe.1}$ – соответственно сопротивления части конструкции трактов вдоха и выдоха, расположенной в обечайке регенеративного патрона без учета устройств моделирования нагрева и сопротивления дыханию; $\Delta P_{pipe.2}$ – сопротивление воздухопроводной системы, соединяющей обечайку патрона модели с лицевой частью; $\Delta P_{heat}, \Delta P_{s.inh.i}$ – сопротивления устройства нагрева ГДС и моделирования сопротивления вдоху соответственно.

Тракт вдоха, состоящий из четырех основных участков, показан на рис. 3. Первый l_1 и третий l_3 участки тракта обеспечивают крепление нагревателя и встраивание устройства нагрева в дыхательный тракт; второй l_2 – нагреватель; четвертый l_4 – гофрированная резиновая трубка, соединяющая лицевую часть модели с рабочей частью. Расчет температуры $T_{s.4}(d_{inh}, l_1, l_2, l_3)$ выполняется при последовательном расчете температуры ГДС для каждого участка.

Для участков l_1, l_3, l_4 температура вычисляется при решении системы уравнений для поля температуры в потоке ГДС, движущемся по каналу, и поля температуры в стенке канала:

$$\frac{\partial T_{s.1,3,4}}{\partial \tau} + \frac{G(\tau)}{S_p} \frac{\partial T_{s.1,3,4}(x, \tau)}{\partial x} = \alpha \frac{\pi dl}{S_{pc}} (t_{w.k}(x, r_0, \tau) - T_{s.k}(x, \tau)); \quad (9)$$

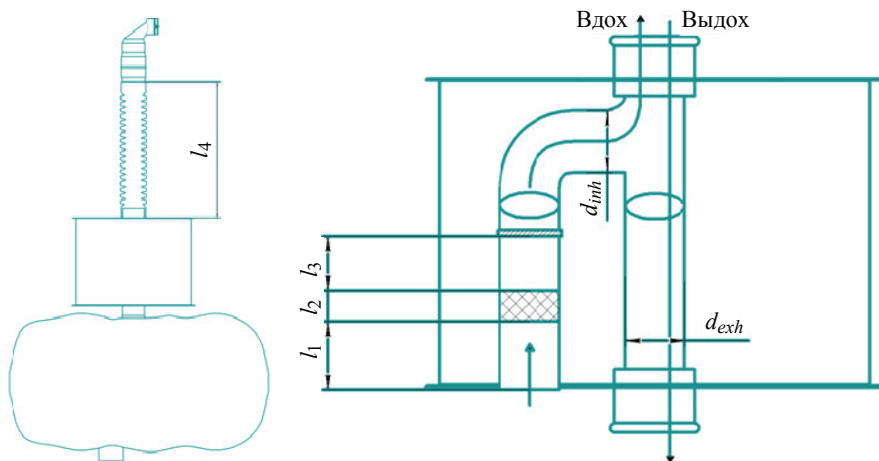


Рис. 3. Определяющие конструктивные размеры рабочей части функциональной модели

$$T_{s.1,3,4}(x, 0) = T_{s.1,3,4}(x, \tau_{i-1}); \quad (10)$$

$$\begin{cases} T_{s.1}(0, \tau) = T_{env.2} \text{ (стадия вдоха)}, T_{s.1}(l_1, \tau) = T_{s.2}(0, \tau) \text{ (стадия выдоха)}; \\ T_{s.3}(0, \tau) = T_{s.2}(0, \tau) \text{ (стадия вдоха)}, T_{s.3}(l_3, \tau) = T_{s.4}(0, \tau) \text{ (стадия выдоха)}; \\ T_{s.4}(0, \tau) = T_{s.3}(0, \tau) \text{ (стадия вдоха)}, T_{s.4}(l_4, \tau) = 36,6 \text{ (стадия выдоха)}; \end{cases} \quad (11)$$

$$\frac{\partial t_{w.1,3,4}(x, r, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_1^2 \left(\frac{\partial^2 t_{w.1,3,4}(x, r, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_{w.1,3,4}(x, r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_{w.1,3,4}(x, r, \tau)}{\partial r} \right); \quad (12)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t_{w.1,3,4}(x, r_0, \tau)}{\partial r} - \alpha(t_{w.1,3,4}(x, r, \tau) - T_{s.1,3,4}(x, r)) = 0; \quad (13)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t_{w.1,3,4}(x, r_1, \tau)}{\partial r} + \alpha_{env.1}(t_{w.1,3,4}(x, r_1, \tau) - T_{env.1}(\tau)) = 0; \quad (14)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t_{w.1}(0, r, \tau)}{\partial x} + \alpha_{env.1}(t_{w.1}(0, r, \tau) - T_{env.1}(\tau)) = 0; \quad (15)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial t_{w.4}(x, r_1, \tau)}{\partial r} + \alpha_{env.2}(t_{w.4}(x, r_1, \tau) - T_{env.2}) = 0; \quad (16)$$

$$t_{w.1}(l_1, r, \tau) = T_{heat}; \quad (17)$$

$$t_{w.3}(l_3, r, \tau) = t_{w.4}(0, r, \tau); \quad (18)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t_{w.3}(l_3, r_1, \tau)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial t_{w.4}(0, r_1, \tau)}{\partial x}, \quad t_{w.3}(l_3, r, \tau) = t_{w.4}(0, r, \tau); \quad (19)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial t_{w.4}(x, r_1, \tau)}{\partial x} + \alpha_{env.2}(t_{w.4}(l_4, r, \tau) - T_{env.2}) = 0; \quad (20)$$

$$\overline{t_{w.1,3}}(\tau) = \int_0^l \int_{r_0}^{\eta_1} t_{w.1,3}(x, r_1, \tau) dr dx; \quad (21)$$

$$\frac{V_c}{S} \frac{\partial T_{env.1}(\tau)}{\partial \tau} = \alpha_{env.1} (\overline{t_{w.1,2,3}}(\tau) - T_{env.1}(\tau)), \quad x \in (0, l_1); \quad (22)$$

$$T_{env.1}(0) = T_{env.1}(\tau_{i-1}), \quad (23)$$

где $t_{w.1}(x, r, \tau)$ – температура стенки тракта на участке l_1 , по которому движется ГДС; λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности стенок дыхательного тракта на участках l_1, l_3 и l_4 соответственно; α – коэффициент теплоотдачи при движении ГДС по участкам тракта; $\alpha_{env.1}, \alpha_{env.2}$ – коэффициенты теплоотдачи от стенок участков дыхательного тракта к воздуху в объеме, ограниченном обечайкой регенеративного патрона, и в окружающую среду соответственно; τ_{i-1} – предыдущий момент времени для которого выполнялся расчет; $\overline{t_{w.1}}(\tau)$ – средняя интегральная температура внешней поверхности стенки канала по длине.

Для участка l_2 температура $T_{s.2}$ вычисляется следующим образом:

– для стадии вдоха уравнение (24) решается относительно $T_{s.2}(l_2, \tau_i)$

$$\overline{Gc}(T_{s.2}(l_2, \tau_i) - T_{s.2}(0, \tau_i)) = \alpha F(T_{heat} - T_{s.2}(l_2, \tau_i)), \quad T_{s.2}(0, \tau_i) = T_{s.1}(l_1, \tau_i); \quad (24)$$

– для стадии выдоха уравнение (25) решается относительно $T_{s.2}(0, \tau_i)$

$$\overline{Gc}(T_{s.2}(0, \tau_i) - T_{s.2}(l_2, \tau_i)) = \alpha F(T_{heat} - T_{s.2}(0, \tau_i)), \quad T_{s.2}(l_2, \tau_i) = T_{s.3}(0, \tau_i), \quad (25)$$

где $\overline{G}$ – средний расход за время такта вдоха и выдоха; c – теплоемкость газовой дыхательной смеси; F – площадь теплообмена нагревателя; T_{heat} – температура нагревателя; τ_i – текущий интервал времени (или такт вдоха/выдоха), для которого проводится расчет.

При этом также учитывается нагрев воздуха, находящегося в объеме обечайки, в соответствии с уравнениями (22), (23) для $x \in (0, l_2)$.

Для расчета искомой функции температуры $T_{s.4}(x, \tau)$ использованы аналитические решения задачи теплопроводности для полого ограниченного цилиндра с функционально меняющейся температурой окружающей среды со стороны боковых поверхностей и дифференциального уравнения переноса тепла потоком ГДС, движущейся в режиме идеального вытеснения по каналу с учетом переноса тепла теплопроводностью.

Решение сформулированной задачи структурно-параметрического синтеза обеспечивает поиск варианта конструкции K и его определяющих конструктивных параметров $d_{inh}, d_{exh}, l_1, l_2, l_3$. Для ее решения в работе предложен двух-этапный алгоритм.

Первый этап предполагает поиск вариантов конструкции, которые удовлетворяют ограничению (2) на стоимость изготовления модели. Он осуществляется в рамках множества готовых, уже разработанных ранее, конструктивных решений. Среди всего множества существующих вариантов конструкции выбирается такой, значение стоимости изготовления которого меньше значения S_i , заданного в ограничении, и находится ближе всего к этому значению.

На втором этапе для него выполняется поиск определяющих конструктивных параметров модели $d_{inh}, d_{exh}, l_1, l_2, l_3$. В данном случае для решения задачи определен метод покоординатного спуска с ограничениями ввиду его надежности и отсутствия необходимости использования дополнительных математических преобразований.

**Результаты выполненных экспериментальных исследований
разработанных вариантов конструкций элементов функциональной модели**

На рисунке 4 показана конструкция заслонки лепесткового типа, где изменение диаметра проходного сечения тракта обеспечивается лепестковой диафрагмой. На рисунке 5 представлены зависимости сопротивления вдоху и выдоху от степени открытия заслонки для легочных вентиляций 35 и 70 л/мин:

$$\begin{aligned} y_1(a) &= -0,0008a^3 - 0,1442a^2 + 11,617a + 537,61; \\ y_2(a) &= 0,0011a^3 - 0,1909a^2 + 13,109a + 134,66; \\ y_3(a) &= -0,0015a^3 + 0,203a^2 - 12,028a - 169,3; \\ y_4(a) &= -0,0018a^3 + 0,2707a^2 - 17,079a - 571,74. \end{aligned}$$

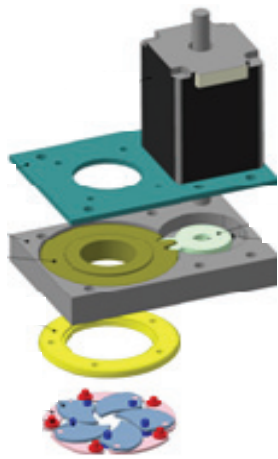
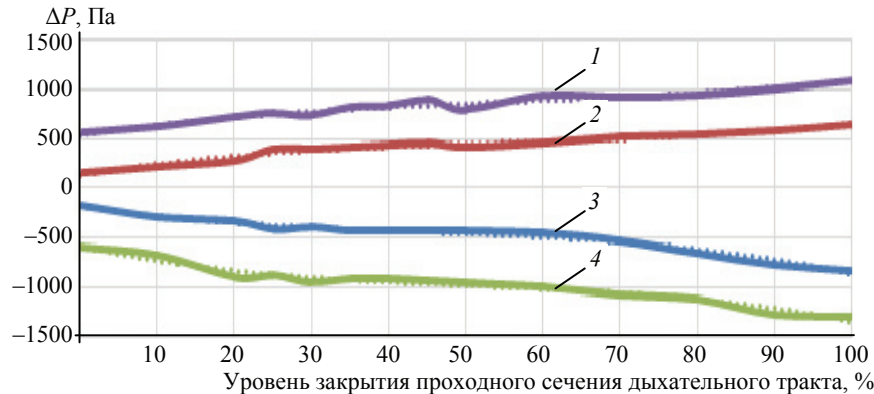


Рис. 4. Конструкция заслонки лепесткового типа



**Рис. 5. Зависимости сопротивления вдоху от степени открытия заслонки
для конструкции с разделением трактов:
2, 3 – для 35 л/мин; 1, 4 – 70 л/мин**

Сформулированная задача структурно-параметрического синтеза определяет диаметры дыхательных трактов как варьируемые переменные. Для получения зависимости сопротивления дыханию от угла поворота заслонки и диаметра дыхательного тракта предложен метод, при котором необходимая для решения задачи структурно-параметрического синтеза зависимость $\Delta p(d, \alpha_j)$ представлялась произведением двух функций

$$\Delta p(d, \alpha_j) = s(d)y(a), \tag{26}$$

где $s(d)$ – функция сопротивления дыханию от диаметра дыхательного тракта; $y(a)$ – определенная ранее функция сопротивления дыханию, в зависимости от степени открытия заслонки, для дыхательного тракта диаметром 0,025 м

Исследования проводились для следующих значений диаметра дыхательной трубки, м: 0,005; 0,009; 0,013; 0,017; 0,021; 0,025 и легочной вентиляции 35 и 70 л/мин. На рисунке 6 представлены графики полученных зависимостей изменения сопротивления вдоху и выдоху для легочной вентиляции 35 и 70 л/мин соответственно:

$$y_1 = 2,3026e^{-35,54x}; \quad y_2 = 5,286e^{-66,43x}.$$

После получения зависимостей $s(d)$ была проверена точность расчета значений сопротивления дыханию в зависимости от диаметра дыхательного тракта и степени открытия заслонки при использовании предложенного метода представления функции $\Delta p(d, \alpha)$ как произведения двух функций $s(d)$ и $y(a)$.

Ошибка вычислений, согласно предложенному методу, составила 15 %. Полученное значение погрешности не превышает привносимую критериальными уравнениями, которые используются при вычислении значений критерия. Результаты представлены в табл. 1.

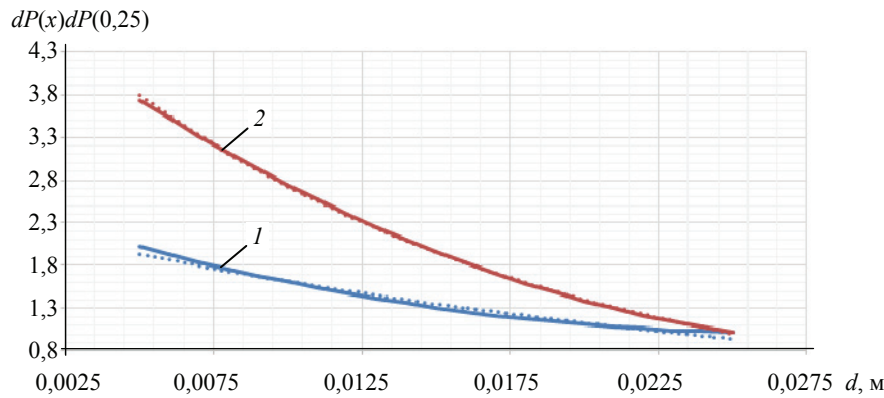


Рис. 6. Зависимость сопротивления вдоху 1 и выдоху 2 от диаметра дыхательного тракта

Таблица 1

Сравнение экспериментальных и расчетных значений сопротивления дыхания

Легочная вентиляция	$\Delta P_{изм}, \text{Па}$	$\Delta P_{расч}, \text{Па}$	$\Delta P_{изм} - \Delta P_{расч}, \text{Па}$
35 л/мин	150	171	21
70 л/мин	380	437	57

В работе проанализированы варианты нагревателей, на основе которых может быть выполнено устройство нагрева ГДС. По результатам экспериментальных исследований различных вариантов конструкций нагревателей, проведенных на установке «ИЛ» определено, что все они обеспечивают схожие параметры нагрева ГДС. Поэтому решение о выборе варианта нагревателя принималось на основе удобства установки нагревательного элемента, в результате чего был выбран метод нагрева с помощью керамического нагревателя.

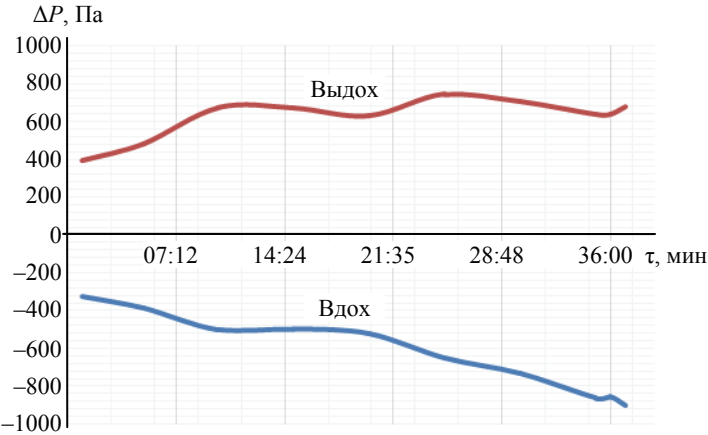
На установке «ИЛ» выполнено определение зависимостей характеристик ИДА, таких как $T(\tau_i)$, $\Delta P_{inh,i}(\tau_i)$, $\Delta P_{exh,i}(\tau_i)$ (рис. 7).

В процессе решения задачи структурно-параметрического синтеза зависимости $T(\tau_i)$, $\Delta P_{inh,i}(\tau_i)$, $\Delta P_{exh,i}(\tau_i)$ представлялись в табличном виде.

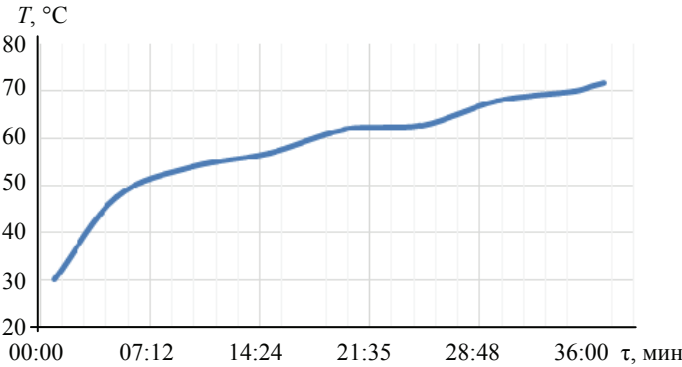
Ограничения и пределы изменения значений составляющих критерия оптимальности определены на основе особенностей использования самоспасателя, его конструктивных характеристик и внешнего вида рабочей части.

Ограничение на стоимость изготовления модели определено из стоимости самоспасателя ШСС-ТМ и ресурса эксплуатации модели

$$S(K) \leq 220\,000 \text{ р.} \tag{27}$$



а)



б)

Рис. 7. Зависимости изменения сопротивления выдоху, выдоху (а) и температуры газовой дыхательной смеси (б) для самоспасателя ШСС-ТМ

Ограничение на массу модели определено исходя из значения массы самоспасателя ШСС-ТМ, приведенным в боевое положение $M_d = 3$ кг:

$$M(K, \{d_{inh}, d_{exh}, l_1, l_2, l_3\}) = 3 \text{ кг.}$$

Ограничения на эквивалентность внешнего вида модели внешнему виду дыхательного аппарата определяются двумя типами ограничений – на геометрические параметры обечайки модели и ее воздухопроводной системы.

$$\overline{Q}(K, \{K_1, K_2, \dots, K_m\}) \leq (K, \{K_1 = 143 \text{ мм}, K_2 = 183 \text{ мм}, K_3 = 76 \text{ мм}\}). \quad (28)$$

Геометрические параметры воздухопроводной системы модели определены также измерением основных размеров

$$\overline{J}(K, \{K_1, K_2, \dots, K_m\}) = (K_1 = 20 \text{ мм}, K_2 = 210 \text{ мм}). \quad (29)$$

Значения пределов изменения составляющих критерия оптимальности:

$$T_0 = 36 \text{ }^\circ\text{C}; T_1 = 55 \text{ }^\circ\text{C}; \Delta P_0 = 300 \text{ Па}; \Delta P_1 = 1000 \text{ Па.}$$

Вариант конструкции модели самоспасателя ШСС-ТМ представлен на рис. 8. В его основу положена конструкция устройства моделирования сопротивления дыханию на основе лепестковой диафрагмы и конструкция устройства нагрева на основе керамического нагревателя.

Устройство моделирования сопротивления дыханию состоит из привода, управляемого блоком управления, орбитальной зубчатой передачи и запорного элемента в виде лепестков, перекрывающего сечение.

Стоимость изготовления разработанной для функциональной модели конструкции без разделения трактов вдоха и выдоха составила 140 500 р., с разделением – 236 000 р. Второй вариант выходит за рамки определенного ограничения.

Далее выполнялся поиск конструктивных параметров полученной конструкции. В таблице 2 представлены результаты расчета критерия оптимальности для различных значений варьируемых параметров.

Исходя из полученных в результате решения оптимизационной задачи значений основных параметров конструкции могут быть определены конструктивные характеристики ее элементов и их взаимосвязь.

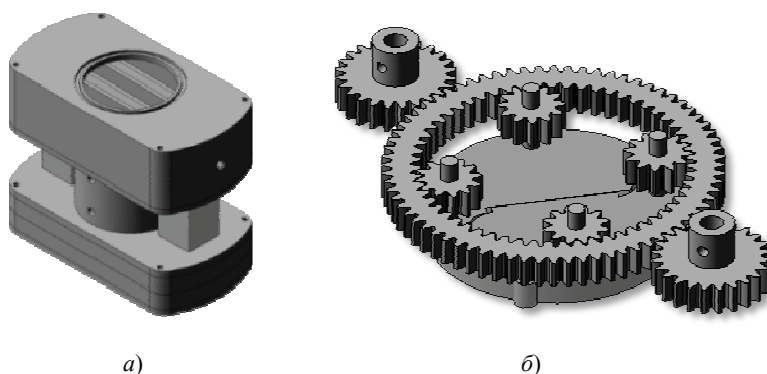


Рис. 8. Конструкция элементов функциональной модели самоспасателя ШСС-ТМ:

а – общий вид; *б* – механизм привода лепестков, ограничивающих проходное сечение дыхательного тракта

Таблица 2

Рассчитанные значения критерия

Значения варьируемых переменных				Значение критерия оптимальности
d_{inh}	l_1	l_2	l_3	
0,005	0,010	0,010	0,01	0,53
0,010	0,010	0,010	0,01	0,47
0,015	0,010	0,010	0,01	0,42
0,020	0,015	0,015	0,015	0,38
0,020	0,015	0,020	0,015	0,34
0,020	0,015	0,025	0,015	0,29
0,020	0,020	0,025	0,020	0,25
0,020	0,020	0,030	0,020	0,23
0,020	0,020	0,035	0,020	0,26

Заключение

По результатам проведенных расчетов определены режимные и конструктивные факторы ИДА, оказывающие влияние на человека. Проанализирована степень влияния ответа человеческого организма на каждый из определенных факторов на эффективность работы ИДА. Сформулированы требования к функциональным моделям ИДА и задача их структурно-параметрического синтеза, обеспечивающая поиск варианта конструкции и его определяющих конструктивных параметров в зависимости от типа и назначения моделируемого ИДА, при минимальном отличии зависимостей изменения температуры ГДС и сопротивления дыханию, воспроизводимых моделью и дыхательным аппаратом в течение времени их работы.

Разработан двухэтапный алгоритм решения задачи структурно-параметрического синтеза, обеспечивающий, на первом этапе, выбор оптимального варианта конструкции с точки зрения его стоимости, на втором – поиск значений определяющих конструктивных параметров найденного варианта. Разработан метод получения эксплуатационных характеристик ИДА для параметрической идентификации функциональной модели в процессах постановки и решения задачи структурно-параметрического синтеза, в основу которого положено дополнение установки «ИЛ» автоматизированной системой регистрации параметров работы дыхательных аппаратов. Ее использование позволило повысить точность результатов исследований ИДА на установках «ИЛ» в среднем в 7 раз.

Разработаны варианты конструкций устройств моделирования сопротивления дыханию и нагрева газовой дыхательной смеси и на их основе конструкции функциональной модели – с разделением и без разделения трактов вдоха и выдоха. Показано, что большую точность обеспечивает модель с разделенными трактами, при этом стоимость ее изготовления выше в 1,68 раза по сравнению с конструкцией без разделения трактов. Выполнено экспериментальное исследование сопротивления вдоху и выдоху для разработанных вариантов конструкций устройств моделирования сопротивления дыханию. Для каждого варианта конструк-

ции получены аппроксимационные зависимости сопротивления вдоху и выдоху от степени открытия проходного сечения дыхательного тракта и его диаметра для значений легочной вентиляции 35 л/мин и 70 л/мин. Сформулирована и решена задача структурно-параметрического синтеза функциональной модели самоспасателя ШСС-ТМ. Исследования могут быть продолжены в направлении дальнейшей формализации системных связей элементов функциональной модели для возможности повышения степени автоматизации процесса ее синтеза.

Список литературы

1. Холдэн, Дж. С. Дыхание / Дж. С. Холдэн, Дж. Г. Пристли ; пер. с англ. Е. М. Беркович, Л. М. Модель ; под ред. М. Е. Маршака. – М. – Л. : Биомедгиз, 1937. – 461 с.
2. Диденко, Н. С. Регенеративные респираторы для горноспасательных работ / Н. С. Диденко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1990. – 156 с.
3. Структурно-параметрический синтез системы поддержки принятия решений при проектировании и эксплуатации тепло- и массообменного оборудования / Е. Н. Малыгин, М. Н. Краснянский, Е. Н. Туголуков, С. Ю. Алексеев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-а. – 2019. – Т. 25, № 3. – С. 350 – 359. doi: 10.17277/vestnik.2019.03.pp.350-359
4. Mobile Robots in Mine Rescue and Recovery / R. R. Murphy J. Kravitz, S. Stover, R. Shoureshi // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 2009. – Vol. 16, No. 2. – P. 91 – 103.
5. Немцев, А. В. Актуальные вопросы применения изолирующих промышленных самоспасателей. Часть 1. Самоспасатели на химически связанном кислороде / А. В. Немцев, Э. М. Вэстмоллэнд // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 2. – С. 62 – 66.
6. Development of Algorithmic and Mathematical Support of Adaptive Training Complexes / D. L. Dedov, M. N. Krasnyanskiy, A. A. Obukhov [et al.] // Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 02 – 08 July, 2018, Sofia, Bulgaria. – Sofia, 2018. – Vol. 18. – P. 279 – 286.
7. New Mobile Wireless Imitator of Mine Insulating Self-Rescuer / S. Karpov, A. Glebov, S. Alexeev [et al.] // Proceedings 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 02 – 08 July, 2018, Sofia, Bulgaria. – Sofia, 2018. – Vol. 18. – P. 33 – 40.

Structural and Parametric Synthesis of Functional Models of Self-Contained Breathing Apparatus

S. Yu. Alekseev¹, A. Yu. Zakharov²

*“Corporation Roskhimzashchita” OJSC (1), sergei.alexeev-dt@yandex.ru;
Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering” (2),
nemtinov@mail.gaps.tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: self-contained breathing apparatus; system of imitation of breathing processes; structural-parametric synthesis; training complexes.

Abstract: Based on the analysis of factors affecting a person when using self-contained breathing apparatus, the problem of structural and parametric synthesis of functional models of breathing apparatus is formulated, the solution of which ensures

the minimum deviation of the mode characteristics of the model from the mode characteristics of the device. An algorithm is developed for solving the formulated problem, a method for determining the dependences of changes in the parameters of the respiratory apparatus over time, to determine possible design options for common elements. The solution of the formulated problem of structurally parametric synthesis is illustrated by the example of the functional model of the ShSS-TM self-rescuer.

References

1. Kholden Dzh.S., Pristli Dzh.G., Marshak M.Ye. [Ed.] *Dykhaniye* [Breath], Moscow - Leningrad: Biomedgiz, 1937, 461 c. (In Russ.)
2. Didenko N.S. *Regenerativnyye respiratory dlya gornospasatel'nykh rabot* [Regenerative respirators for mine rescue], Moscow: Nedra, 1990, 156 p. (In Russ.)
3. Malygin Ye.N., Krasnyanskiy M.N., Tugolukov Ye.N., Alekseyev S.Yu. [Structural and parametric synthesis of a decision support system for the design and operation of heat and mass transfer equipment], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 3, pp. 350-359, doi: 10.17277/vestnik.2019.03.pp.350-359 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Murphy R.R., Kravitz J., Stover S., Shoureshi R. Mobile Robots in Mine Rescue and Recovery, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2009, vol. 16, no. 2, pp. 91-103.
5. Nemtsev A.V., Vestmorlend E.M. [Actual issues of the use of insulating industrial self-rescuers. Part 1. Self-rescuers on chemically bound oxygen], *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Labor safety in industry], 2013, no. 2, pp. 62-66. (In Russ.)
6. Dedov D.L., Krasnyanskiy M.N., Obukhov A.A., Alexeev S.Yu., Zakharov A.Yu. Development of Algorithmic and Mathematical Support of Adaptive Training Complexes, *Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*, 02 - 08 July, 2018, Sofia, Bulgaria, Sofia, 2018, vol. 18, pp. 279-286.
7. Karpov S., Glebov A., Alexeev S., Arkhipov A., Siukhin A. New Mobile Wireless Imitator of Mine Insulating Self-Rescuer, *Proceedings 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*, 02 - 08 July, 2018, Sofia, Bulgaria, Sofia, 2018, vol. 18, pp. 33-40.

Struktur-parametrische Synthese von Funktionsmodellen der isolierenden Atemschutzgeräte

Zusammenfassung: Basierend auf der Analyse von Faktoren, die eine Person bei Verwendung des Atemgeräts beeinflussen, ist das Problem der strukturellen und parametrischen Synthese von Funktionsmodellen der Atemgeräte formuliert, deren Lösung die minimale Abweichung der Modenmerkmale des Modells von den Modenmerkmalen des Geräts sicherstellt. Es ist ein Algorithmus zur Lösung des formulierten Problems entwickelt, ein Verfahren zur Bestimmung der Abhängigkeiten von Änderungen der Parameter des Atemgeräts in der Zeit, um mögliche Entwurfsoptionen für gemeinsame Elemente zu bestimmen. Die Lösung des formulierten Problems der strukturparametrischen Synthese ist am Beispiel des Funktionsmodells des ShSS-TM-Selbststretters veranschaulicht.

Synthèse structuro-paramétrique des modèles fonctionnels d'appareils respiratoires

Résumé: A la base de l'analyse des facteurs qui affectent une personne lors de l'utilisation d'un appareil respiratoire, est formulé le problème de la synthèse structurelle et paramétrique des modèles fonctionnels d'appareils respiratoires dont la solution garantit une déviation minimale des caractéristiques de régime du modèle par rapport aux caractéristiques de régime de l'appareil. Sont élaborés un algorithme pour résoudre le problème formulé, une méthode pour déterminer les dépendances de la modification des paramètres de l'appareil respiratoire dans le temps, permettant de déterminer les variantes possibles de la conception des éléments communs. La solution du problème formulé de la synthèse structurellement paramétrique est illustrée par l'exemple du modèle fonctionnel de l'auto-sauveteur ChSS-TM.

Авторы: *Алексеев Сергей Юрьевич* – кандидат технических наук, начальник сектора автоматизированных систем, АО «Корпорация «Росхимзащита»; *Захаров Александр Юрьевич* – аспирант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

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

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ ПРИ УПРАВЛЕНИИ НАДЕЖНОСТЬЮ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Г. Б. Диго, Н. Б. Диго

*Лаборатория управления надежностью сложных систем, digo@iacp.dvo.ru;
ФГБУН «Институт автоматики и процессов управления
Дальневосточного отделения РАН», г. Владивосток, Россия*

Ключевые слова: детерминированный критерий; дефицит информации; запас работоспособности; параметрическая коррекция.

Аннотация: Рассмотрены вопросы коррекции параметров технических систем и устройств, обеспечивающих наилучшие или требуемые показатели их надежного и безопасного функционирования. Выявлены ситуации, когда параметрическая коррекция со стохастическим критерием оптимальности не приводит к практически приемлемым результатам. Проанализированы возможности перехода от стохастического критерия оптимальности к некоторым детерминированным, позволяющим получать квазиоптимальные решения, уточняемые разными методами; проблема оптимальной коррекции значений внутренних параметров технической системы по критерию запаса работоспособности. Предложены методы назначения допусков на корректируемые параметры систем и оптимального выбора номинальных значений параметров, а также алгоритмы проведения необходимых профилактических мероприятий.

Введение

Одним из способов управления надежностью и безопасностью многих технических систем, в частности радиоэлектронных устройств и непрерывных технологических процессов, является коррекция их параметров, предотвращающая нежелательные явления в поведении данных объектов [1]. Она позволяет обеспечивать наилучшие или требуемые показатели надежного и безопасного функционирования, но требует решения ряда сложных и трудоемких задач, среди которых выбор совокупности корректируемых параметров, назначение диапазонов их изменения, выбор стратегии коррекции. При этом должны компенсироваться отклонения параметров от расчетных значений, вызванные нестабильностью, технологическими разбросами, изменениями внешних условий. Кроме того, часто приходится решать проблемы поддержания необходимого уровня надежности, исключения возможных отказов, оптимального планирования мероприятий по обслуживанию данных систем. У систем ответственного назначения или уникальных технических систем на первый план выходят вопрос надежности конкретной системы, а не систем данного типа, и не проблема фиксации отказов, а возможность их предотвращения [2, 3].

Параметрические возмущения, вызываемые технологическими, эксплуатационными и другими различными факторами, не всегда учитываются из-за отсутствия необходимой априорной информации о вероятностных характеристиках от-

клонений параметров от расчетных значений или ее недостаточной полнотой. Поэтому в условиях дефицита информации одной из важных и сложных проблем является наличие априорной неопределенности относительно закономерностей дрейфа параметров объектов, условий эксплуатации, ошибок измерения и контроля. В таких условиях методика параметрической коррекции может сводиться к набору стратегий, обеспечивающих получение решения при имеющейся информации, используя принципы адаптации, минимакса, робастности, и переходу к детерминированным критериям, не требующим знания полных вероятностных характеристик случайных величин, описывающих математическую модель системы.

В статье обсуждается проблема оптимальной коррекции значений внутренних параметров технической системы при замене исходного стохастического критерия оптимальности на детерминированный, позволяющий получить квазиоптимальное, в дальнейшем уточняемое решение. В качестве объекта исследований рассматриваются технические системы заданной структуры со случайными параметрами, варьируемыми в заданных пределах. Подразумевается, что коррекция значений параметров позволит не нарушать условия ее работоспособности за заданное время эксплуатации.

Постановка и анализ задачи

Рассматривается техническая система, качество работы которой зависят от значений параметров ее элементов $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$, $\mathbf{x} \in R^n$. Информация о возможных вариациях значений внутренних параметров задана в виде неравенств:

$$x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max}, \quad x_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

определяющих область их допустимых изменений.

Заданы условия работоспособности системы

$$a_j \leq y_j(\mathbf{x}) \leq b_j, \quad j = 1, \dots, m; \quad (2)$$

$\mathbf{y} = \{y_j\}_{j=1}^m$ – вектор выходных параметров;

$$y_j = F_j(x_1, \dots, x_n), \quad (3)$$

где $F_j(\cdot)$ – известный оператор, зависящий от топологии исследуемой системы; $a_j, b_j, j = 1, \dots, m$ – ограничения на его компоненты. Зависимости (3) обычно задаются неявно, в алгоритмической форме или в виде численного решения систем уравнений [3].

Предполагается, что в процессе проектирования разрабатываемого объекта, кроме его заданной структуры, рассчитаны номинальные значения параметров элементов $x_{1 \text{ ном}}, x_{2 \text{ ном}}, \dots, x_{n \text{ ном}}$, удовлетворяющие условиям работоспособности.

Реальные значения внутренних параметров имеют отклонения от расчетных данных, возникающие под влиянием различных факторов, действующих в процессе производства, хранения и эксплуатации, и носят случайный характер. Поэтому они являются случайными функциями времени $X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)$, а условия работоспособности (2) могут выполняться лишь с некоторой вероятностью

$$P(T) = P\{A \leq y[X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)] \leq B, \quad \forall t \in [0, T]\}, \quad (4)$$

где T – требуемое время функционирования объекта.

При известных зависимостях (3) на основании (2) можно построить область работоспособности D и представить вероятность безотказной работы (4) в виде

$$P(T) = P\{\mathbf{X}(t) \in D, \forall t \in [0, T]\}. \quad (5)$$

В случае выполнения неравенства $P(T) < P_{\text{тр}}$, где $P_{\text{тр}}$ – требуемое ограничение на вероятность $P(T)$, находятся номинальные значения параметров $x_{1\text{ ном}}^0, x_{2\text{ ном}}^0, \dots, x_{n\text{ ном}}^0$, доставляющие максимум вероятности (5).

Задача оптимальной коррекции номиналов сводится к нахождению вектора $\mathbf{e} = (e_1, e_2, \dots, e_n)$, для которого

$$P\{\mathbf{X}(t) + \mathbf{e} \in D, \forall t \in [0, T]\} = \max P(T).$$

Отсутствие необходимой априорной информации о вероятностных свойствах отклонений параметров от расчетных значений или ее недостаточная полнота приводят к необходимости перехода к детерминированным критериям, например, критерию запаса работоспособности, не требующего знания полных вероятностных характеристик случайных величин, описывающих математическую модель системы. Они, в отличие от статистических критериев, имеют более ясную физическую интерпретацию, но при расчете запаса работоспособности по каждому из внутренних параметров оценка их влияния на выполнение того или иного условия работоспособности системы в целом усложняется.

Любая комбинация внутренних параметров $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ однозначно определяет некоторую совокупность выходных величин $\mathbf{y} = (y_1(\mathbf{x}), y_2(\mathbf{x}), \dots, y_m(\mathbf{x}))$

и, таким образом, некоторую точку $\mathbf{y} \in R^m$ в m -мерном пространстве выходных параметров. При этом обратное отображение не всегда является однозначным: одному и тому же набору значений выходных параметров могут соответствовать несколько различных векторов внутренних параметров.

Запас работоспособности на уровне вектора внутренних параметров позволяет оценить степень его удаленности от границ области работоспособности и, следовательно, пределы возможных вариаций параметров элементов, не нарушающих условия работоспособности. Тогда коррекция сводится к нахождению таких значений корректируемых параметров внутри области работоспособности D , при которых расчетная точка находится на максимальном в смысле выбранного критерия расстоянии от ее границ.

Будем говорить, что совокупность внутренних параметров является решением, удовлетворяющим условиям работоспособности, если соответствующий им вектор выходных параметров лежит в m -мерном полиэдре D_y , задаваемом выходными ограничениями, а обеспечение необходимой параметрической надежности в процессе эксплуатации достигается коррекцией значений внутренних параметров. Их выбор, количество и значения, с которых начинается корректировка, периодичность корректировок определяются выбранной стратегией, гарантирующей требуемый уровень параметрической надежности. Она задает целенаправленное изменение значений корректируемых параметров, которые в свою очередь влияют на характеристики случайных процессов, описывающих эволюцию объекта, позволяя им достигнуть максимальных или заданных значений, решая тем самым один из вариантов задачи параметрической коррекции.

Формирование критерия запаса работоспособности

Согласно [6], детерминированный критерий запаса работоспособности формируется на уровне внутренних или выходных параметров и имеет более ясную физическую интерпретацию, чем стохастические критерии. Это может быть,

например, измеряемое определенным образом расстояние от номинальной точки до границы области работоспособности. При этом в тех ситуациях, когда расчет запаса работоспособности по каждому из внутренних параметров затрудняет оценку их влияния на выполнение того или иного условия работоспособности системы в целом, целесообразен переход к критериям запаса работоспособности относительно выходных, а не внутренних параметров системы, ограничения на которые и составляют заданные условия ее работоспособности. Такой же тип критерия удобно использовать в тех ситуациях, когда область работоспособности D_x неизвестна, выполнение условий работоспособности при выбранных внутренних параметрах проверяется путем вычисления соответствующих значений выходных параметров и их сравнения с требованиями технического задания (принадлежность области допустимых значений выходных параметров D_y). Его формирование и применение подробно описано в [6].

Решение задачи оптимальной коррекции номиналов на уровне выходных параметров представляет определенный практический интерес и обладает тем преимуществом, что пространство выходных параметров имеет, как правило, небольшую размерность (в ряде случаев удается ограничиться рассмотрением одного выходного параметра). Однако управление выходными параметрами осуществляется путем коррекции внутренних, и, следовательно, даже при выбранных оптимально номинальных значениях выходных параметров остается открытым вопрос о номинальных значениях внутренних параметров, доставляющих оптимум на уровне выходных. Кроме того, немаловажен тот факт, что статистические характеристики внутренних параметров (параметров элементов) получить значительно легче, чем аналогичные характеристики системы. Это объясняется тем, что элементы имеют больший «моральный» срок жизни, чем система, и, следовательно, более устойчивые статистические характеристики [7].

В случае применения критерия запаса работоспособности относительно внутренних параметров ищется такой вектор номинальных значений параметров $\mathbf{x}_{\text{ном}}$, для которого

$$\mathbf{x}_{\text{ном}} = \arg \max_{\mathbf{x}_{\text{ном}} \in D_x} \min_{1 \leq j \leq m} S_j(\mathbf{x}_{\text{ном}}), \quad (6)$$

а функция $S(\mathbf{x}) = \min S_j(\mathbf{x}_{\text{ном}})$ – минимальный запас работоспособности.

Оптимизационная задача (6) является максиминной, заключается в нахождении таких значений внутренних параметров, при которых номинальная точка $\mathbf{x}_{\text{ном}} = (x_{1\text{ном}}, \dots, x_{n\text{ном}})$ максимально удалена от границ D_x , и преобразуется к виду

$$\max_{\mathbf{x}_{\text{ном}} \in D} \min_{j \in [1, m]} S_j(\mathbf{x}_{\text{ном}}), \quad (7)$$

где m – количество условий работоспособности. Метод решения задачи (7) приведен в [8].

Выбор оптимальных значений корректируемых параметров

В общем случае выбор оптимальных значений корректируемых параметров, обеспечивающих максимальный запас работоспособности системы, может осуществляться методами поисковой оптимизации.

Одной из стратегий поиска оптимальных значений номиналов параметров в условиях неопределенности является использование набора (веера) методов и алгоритмов, адекватных априорной информации о параметрических возмущениях. При этом в каждой отдельной ситуации оптимальным считается результат,

обеспечивающий максимальный гарантированный уровень работоспособности при данном объеме исходной информации. Другими словами, в условиях неопределенности оптимальность понимается в минимаксном смысле, с точки зрения получения наилучшего результата при наиболее неблагоприятных из множества допустимых параметрических возмущений.

При отсутствии информации о закономерностях отклонений параметров от расчетных значений, о конфигурации и ориентации области работоспособности в пространстве внутренних параметров в общем виде задача не имеет решения, поэтому приходится рассматривать разные случаи, опираясь на некоторые допущения. С учетом того, что в качестве критерия выбран запас работоспособности, представляется целесообразным рассматривать методы оптимизации, связанные с центрированием области работоспособности [7 – 9] путем вложения в данную область компактного (замкнутого и ограниченного) множества. Это могут быть n -мерные куб, шар, эллипсоид с максимально возможными размерами, центры которых будут соответствовать решению оптимизационной задачи [7, 9]. Цель оптимизации достигается совмещением центров областей работоспособности и варьируемых в заданных пределах возможных изменений внутренних параметров (технологических допусков на внутренние параметры). С геометрической точки зрения задача центрирования области работоспособности состоит в нахождении наибольшего замкнутого ограниченного геометрического тела, вложенного в данную область. Для этого используются алгоритм построения вложенных брусов, метод вписанных эллипсоидов [9], алгоритмы вложения гиперболы наибольшего радиуса [7, 8] и вписывания куба максимального объема [10, 11]. Каждый из них наиболее эффективен при выполнении своих определенных требований. Но поскольку проверка их выполнения в неопределенной среде затруднена или вообще невозможна, для построения геометрического тела максимального объема используется многовариантный подход с применением многовариантных технологий, основанных на параллельной и конвейерной организации расчетов с выбором наилучшего из полученных результатов.

Поскольку оптимальная коррекция призвана отслеживать эволюцию функционирующего объекта, являющуюся многоступенчатым итерационным процессом, состоящим из случайных изменений и последующего отбора, представляется целесообразным использовать оптимизационные методы, основанные на эволюционных вычислениях (ЭВ). Они уточняют неизвестные характеристики, используя накопленную в процессе эволюции информацию, и за приемлемое время находят близкие к оптимальным решения, последовательно преобразуя множество решений [5]. При этом представляется целесообразным применение адаптивных версий эволюционных алгоритмов, учитывающих предысторию поиска и проблемно-ориентированную информацию о допустимых оптимальных решениях.

Анализ некоторых подходов к применению методов ЭВ в задачах оптимальной коррекции параметров технических систем позволяет сделать вывод, что процесс решения ускоряет гибридизация эволюционных или эволюционных и классических алгоритмов.

Одним из вариантов гибридных версий является комбинация ЭВ с методом локального поиска, учитывающего предположение о недифференцируемости целевой функции. Кроме того, в подобных задачах, в зависимости от степени неопределенности имеющейся информации, при гибридизации могут использоваться одинаковые алгоритмы с разными значениями свободных параметров, компенсируя эффективность одного из них слабость другого.

Известны различные способы гибридизации поисковых алгоритмов оптимизации вообще и эволюционных алгоритмов в частности [12, 13], при этом могут потребоваться специальные подходы к их распараллеливанию. Так, если для базового алгоритма достаточно статической балансировки загрузки, то для соответствующего гибридного алгоритма может потребоваться динамическая балансировка [14].

Заключение

Рассмотрены вопросы коррекции параметров технических систем и устройств, обеспечивающих наилучшие или требуемые показатели их надежного и безопасного функционирования. Выявлены ситуации, когда задача в общем виде не имеет решения и приходится рассматривать разные случаи, опираясь на некоторые допущения.

Проанализированы возможности перехода от стохастического критерия оптимальности к некоторым детерминированным критериям, позволяющим получать квазиоптимальные решения, уточняемые разными методами. Рассмотрены проблемы оптимальной коррекции значений внутренних параметров технической системы по критерию запаса работоспособности, предложены методы назначения допусков на корректируемые параметры и оптимального выбора номинальных значений параметров.

При использовании критерия запаса работоспособности на уровне внутренних параметров задача параметрической коррекции сводится к нахождению точек внутри области работоспособности (выбору номиналов параметров), находящихся на максимальном расстоянии от ее границ, поэтому для ее решения наиболее целесообразно использовать методы оптимизации, связанные с центрированием области работоспособности.

Проведенный анализ проблем, возникающих при решении задач параметрической коррекции, позволяет в условиях неопределенности компенсировать отсутствие универсальных методов оптимизации использованием многовариантного анализа на основе технологий параллельных и распределенных вычислений.

При неэффективности классических методов поисковой оптимизации предложено использовать идеи и методы эволюционных вычислений, поскольку такой подход применим для различных видов оптимизируемой функции, в том числе представленной не в аналитическом виде. Однако необходимо учитывать, что выбор алгоритма должен быть индивидуален для каждой конкретной задачи.

Использование гибридных алгоритмов обеспечивает в реальных условиях для каждой конкретной задачи подбор своей последовательности шагов из разных методов, приводящей к наиболее эффективному поиску. Кроме того, в условиях неполной или недостаточной информации об оптимизируемой функции технология комбинирования алгоритмов на основе многометодной технологии в виде параллельных итерационных процессов с выбором лучшего приближения после выполнения очередной итерации всеми выбранными методами дает возможность модифицировать известные алгоритмы, учитывая специфику рассматриваемого объекта.

Список литературы

1. Абрамов, О. В. К проблеме предотвращения аварий технических объектов ответственного назначения / О. В. Абрамов // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 11 – 16.
2. Абрамов, О. В. Планирование профилактических коррекций параметров технических устройств и систем / О. В. Абрамов // Информатика и системы управления. – 2017. – № 3 (53). – С. 55 – 66. doi: 10.22250/isu.2017.53.55-66
3. Абрамов, О. В. Возможности и перспективы функционально-параметрического направления теории надежности / О. В. Абрамов // Информатика и системы управления. – 2014. – № 4 (42). – С. 64 – 77.
4. Абрамов, О. В. Технология параллельных вычислений в задачах анализа и оптимизации / О. В. Абрамов, Я. В. Катуева // Проблемы управления. – 2003. – № 4. – С. 11 – 15.

5. Диго, Г. Б. Применение эволюционных вычислений при управлении параметрической надежностью аналоговых технических устройств и систем / Г. Б. Диго, Н. Б. Диго // Информатика и системы управления. – 2018. – № 4 (58). – С. 70 – 81. doi: 10.22250/isu.2018.58.70-81
6. Абрамов, О. В. Оптимальный параметрический синтез по критерию запаса работоспособности / О. В. Абрамов, Я. В. Катueva, Д. А. Назаров // Проблемы управления. – 2007. – № 6. – С. 64 – 69.
7. Норенков, И. П. Основы автоматизированного проектирования : учеб. для вузов / И. П. Норенков. – М. : Издательство МГТУ им. Н. Е. Баумана, 2000. – 360 с.
8. Диго, Г. Б. Поиск оптимальных значений внутренних параметров технической системы по критерию запаса работоспособности / Г. Б. Диго, Н. Б. Диго // Надежность и качество : тр. Междунар. симпозиума. – Пенза : Информационно-издательский центр ПензГУ, 2009. – Т. 1. – С. 52 – 54.
9. Диго, Г. Б. Задача оптимального параметрического синтеза при дефиците информации о вероятностных характеристиках параметров системы и детерминированных критериях / Г. Б. Диго, Н. Б. Диго // Тр. IV Междунар. конф. «Параллельные вычисления и задачи управления» РАСО 2008, 27 – 29 октября 2008 г., Москва. – М., 2008. – С. 990 – 998.
10. Назаров, Д. А. Реализация критерия запаса работоспособности методом вписывания куба максимального объема / Д. А. Назаров // XXXV Дальневосточная математическая школа-семинар имени академика Е. В. Золотова : сб. докл., 31 августа – 5 сентября 2010 г., Владивосток. – Владивосток, 2010. – С. 772 – 781.
11. Назаров, Д. А. Использование областей работоспособности для оптимального выбора номиналов параметров / Д. А. Назаров // Информатика и системы управления. – 2011. – № 2 (28). – С. 59 – 69.
12. Luke, S. Essentials of Meta-heuristics. A Set of Undergraduate Lecture Notes. – Текст : электронный / S. Luke. – 2009. – URL : <http://cs.gmu.edu/~sean/book/metaheuristics/> (дата обращения: 20.04.2020).
13. Сулимов, В. Д. Применение гибридных алгоритмов глобальной оптимизации к экстремальным задачам для гидромеханических систем / В. Д. Сулимов, П. М. Шкапов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2013. – № 11. – С. 141 – 158.
14. Карпенко, А. П. Гибридные популяционные алгоритмы параметрической оптимизации проектных решений / А. П. Карпенко // Информационные технологии. – 2013. – № S12. – С. 6 – 15.

Parametric Correction for Reliability Management of Technical Systems

G. B. Digo, N. B. Digo

*Laboratory for Reliability Management of Complex Systems, digo@iacp.dvo.ru;
Institute of Automation and Control Processes of Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia*

Keywords: deterministic criterion; lack of information; health reserve; parametric correction.

Abstract: The problems of correction of the parameters of technical systems and devices that provide the best or required indicators of their reliable and safe functioning are considered. Situations were revealed when a parametric correction with a stochastic criterion of optimality does not lead to practically acceptable results. The possibilities of

the transition from the stochastic criterion of optimality to some determinate ones are analyzed, which make it possible to obtain quasi-optimal solutions refined by different methods; the problem of optimal correction of the values of the internal parameters of the technical system according to the criterion of operational margin. Methods of assigning tolerances for adjustable parameters of systems and optimal selection of nominal values of parameters, as well as algorithms for the necessary preventive measures are proposed.

References

1. Abramov O.V. [On the problem of preventing accidents of technical objects of critical use], *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems], 2013, no. 1, pp. 11-16. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Abramov O.V. [Planning for preventive corrections of the parameters of technical devices and systems], *Informatika i sistemy upravleniya* [Informatics and control systems], 2017, no. 3 (53), pp. 55-66, doi: 10.22250/isu.2017.53.55-66 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Abramov O.V. [Opportunities and prospects of the functional-parametric direction of the theory of reliability], *Informatika i sistemy upravleniya* [Informatics and control systems], 2014, no. 4 (42), pp. 64-77. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Abramov O.V., Katuyeva Ya.V. [Technology of parallel computing in analysis problems and optimization], *Problemy upravleniya* [Management Problems], 2003, no. 4, pp. 11-15. (In Russ.)
5. Digo G.B., Digo N.B. [The use of evolutionary computing in controlling the parametric reliability of analog technical devices and systems], *Informatika i sistemy upravleniya* [Informatics and Control Systems], 2018, no. 4 (58), pp. 70-81, doi: 10.22250/isu.2018.58.70-81 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Abramov O.V., Katuyeva Ya.V., Nazarov D.A. [Optimal parametric synthesis according to the criterion of health margin], *Problemy upravleniya* [Control problems], 2007, no. 6, pp. 64-69. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Norenkov I.P. *Osnovy avtomatizirovannogo proyektirovaniya: uchebnik dlya vuzov* [Fundamentals of computer-aided design: a textbook for high schools], Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N. Ye. Baumana, 2000, 360 p. (In Russ.)
8. Digo G.B., Digo N.B. *Nadezhnost' i kachestvo: trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Search for optimal values of the internal parameters of a technical system by the criterion of working capacity], Penza: Informatsionno-izdatel'skiy tsentr PenzGU, 2009, vol. 1, pp. 52-54. (In Russ.)
9. Digo G.B., Digo N.B. *Trudy IV Mezhdunarodnoy konferentsii «Parallel'nyye vychisleniya i zadachi upravleniya» PACO 2008* [Proceedings of the IV International Conference "Parallel Computing and Control Problems" PACO 2008], 27 - 29 October, 2008, Moscow, 2008, pp. 990-998. (In Russ.)
10. Nazarov D.A. *XXXV Dal'nevostochnaya matematicheskaya shkola-seminar imeni akademika Ye. V. Zolotova* [XXXV Far Eastern Mathematical School-Seminar named after Academician E.V. Zolotov], Collection of reports, 31 August – 5 September, 2010, Vladivostok, 2010, pp. 772-781. (In Russ.)
11. Nazarov D.A. [The use of areas of performance for the optimal selection of parameter values], *Informatika i sistemy upravleniya* [Informatics and control systems], 2011, no. 2 (28), pp. 59-69. (In Russ.)
12. <http://cs.gmu.edu/~sean/book/metaheuristics/> (accessed 20 April 2020).
13. Sulimov V.D., Shkapov P.M. [Application of hybrid algorithms of global optimization to extreme problems for hydromechanical systems], *Nauka i obrazovaniye: nauchnoye izdaniye MGTU im. N. E. Baumana* [Science and education:

scientific publication of MSTU them. N. E. Bauman], 2013, no. 11, pp. 141-158. (In Russ.)

14. Karpenko A.P. [Hybrid population algorithms for parametric optimization of design decisions], *Informatsionnyye tekhnologii* [Information Technologies], 2013, no. S12, pp. 6-15. (In Russ., abstract in Eng.)

Parametrische Korrektur bei der Steuerung der Zuverlässigkeit der technischen Systeme

Zusammenfassung: Es sind die Probleme der Korrektur von Parametern technischer Systeme und Geräte, die die besten oder erforderlichen Indikatoren für ihre zuverlässige und sichere Funktionsweise liefern, betrachtet. Es sind Situationen identifiziert, in denen die parametrische Korrektur mit dem stochastischen Optimalitätskriterium nicht zu praktisch akzeptablen Ergebnissen führt. Es sind analysiert worden: die Möglichkeiten des Übergangs vom stochastischen Optimalitätskriterium zu einigen deterministischen Kriterien, um quasioptimale Lösungen zu erhalten, die durch verschiedene Methoden verfeinert werden; das Problem der optimalen Korrektur der Werte der internen Parameter des technischen Systems nach dem Kriterium des Bestandes der Arbeitsfähigkeit. Es sind Methoden zur Zuweisung von Toleranzen für einstellbare Parameter von Systemen und zur optimalen Auswahl von Nennwerten von Parametern sowie Algorithmen für die erforderlichen vorbeugenden Maßnahmen vorgeschlagen.

Correction paramétrique lors du contrôle de la fiabilité des systèmes techniques

Résumé: Sont examinées les questions de la correction des paramètres des systèmes et dispositifs techniques qui fournissent les indicateurs les plus ou les plus nécessaires de leur fonctionnement fiable et sûr. Sont identifiées les situations quand la correction para-métrique avec le critère d'optimalité stochastique n'aboutit pas à des résultats pratiquement acceptables. Sont analysées les possibilités de passer d'un critère d'optimalité stochastique à certains qui sont déterminés et permettent d'obtenir des solutions quasi optimales, affinées par différentes méthodes; problème de la correction optimale des valeurs des paramètres internes du système technique selon le critère de la réserve du fonctionnement. Sont proposées les méthodes pour attribuer des tolérances aux paramètres corrigés des systèmes et pour sélectionner de la manière optimale les valeurs nominales des paramètres, ainsi que des algorithmes pour effectuer les mesures préventives nécessaires.

Авторы: *Дуго Галина Борисовна* – ведущий инженер-математик лаборатории управления надежностью сложных систем; *Дуго Наталья Борисовна* – ведущий инженер-математик лаборатории управления надежностью сложных систем, ФГБУН «Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН», г. Владивосток, Россия.

Рецензент: *Дворецкий Станислав Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ АКТИВНЫХ ПОМЕХ НА РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

В. И. Павлов¹, С. В. Артемова², Т. Ю. Дорохова¹, В. В. Аксенов¹

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» (1),
pravl@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия;*

*кафедра информатики (2), ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский
технологический университет», г. Москва, Россия*

Ключевые слова: активные помехи; подвижный объект; радиолокационная система; самонаведение.

Аннотация: Приведены энергетические соотношения при действии активных помех на радиолокационные информационные системы подвижных объектов для полуактивного и вновь разрабатываемого полупассивного способов самонаведения. На базе энергетических соотношений определена дальность информационного контакта средств, участвующих в реализации способов самонаведения. Указаны перспективы разработки полупассивного способа самонаведения подвижных объектов.

Введение

Многие подвижные объекты (ПО), такие, например, как самолеты, корабли, автомобили и пр., оборудуются бортовыми радиолокационными информационными системами (РИС), позволяющими получать сведения об окружающей обстановке. Бортовые РИС применяются также для самонаведения, то есть сближения ПО с каким-либо объектом, называемым целью. Радиолокационные информационные системы принято классифицировать по способу целеуказания: активные – облучающие цель и наводящиеся по отраженному сигналу (априорно известному); полуактивные – предполагающие, что цель облучается какой-либо другой внешней системой и наводящиеся по отраженному сигналу (опять же – априорно известному); пассивные – наводящиеся по сигналам, излучаемым собственно целью [1]. Весьма важными характеристиками для информационных систем ПО являются пространственная область их применимости, в частности дальность информационного контакта с целью, и помехоустойчивость. Дальность применимости существующих бортовых РИС для различных вариантов их технической реализации и расположения относительно целей достаточно хорошо исследована теоретически и подтверждена практикой [2].

Самонаведение ПО, как правило, осуществляется в условиях активного помехового противодействия со стороны цели, реализуемого станциями постановки помех (ПП) на основании информации от станций радиотехнической разведки (РТР). Известными и часто применяемыми приемами противодействия являются постановка помех прикрития (станция ПП расположена вне цели) и самозащиты (станция ПП входит в состав оборудования цели) [3]. Кроме того, для понижения

радиолокационной заметности и, соответственно, дальности обнаружения, современные объекты, имеющие важное значение, выполняют по так называемой технологии Stealth для уменьшения их эффективной площади отражения [4]. В работе [5] предложен способ полупассивного самонаведения (ППС) ПО, одной из отличительных особенностей которого является повышенная дальность информационного контакта с целью, оборудованной станцией постановки активных помех. Сущность способа ППС заключается в провоцировании станций ПП на излучение помеховых сигналов с желаемыми параметрами с последующим использованием помеховых сигналов для самонаведения ПО [6].

Цель работы – обоснование энергетических соотношений при действии активных помех на радиолокационные информационные системы подвижных объектов и определение потенциальных дальностей применимости подвижных объектов для различных методов самонаведения.

Постановка задачи

Сравнению подлежат энергетические соотношения при функционировании РИС, применяемых для реализации существующего полуактивного и разрабатываемого полупассивного способов самонаведения ПО. В силу объективных обстоятельств данные способы в отличие от других обеспечивают наибольшую дальность применимости ПО. К этим обстоятельствам, прежде всего, относятся: относительно большие мощность P и коэффициент усиления G антенны передатчика зондирующего сигнала; влияние на дальность информационного контакта с целью длины волны λ зондирующего сигнала, эффективной площади рассеяния σ цели, а также особенностей распространения электромагнитной энергии по каналам «запроса» и «ответа» в соответствии с уравнениями радиолокации и противорадиолокации.

Для выявления наиболее существенных факторов влияния на дальность применимости ПО рассматривается следующая ситуация. Цель представляет собой летательный аппарат (ЛА), выполненный по технологии Stealth и оборудованный станциями РТР и ПП, при этом станция ПП может обладать передатчиком помех генераторного (постоянная выходная мощность) и/или ретрансляционного (варьируемая выходная мощность) типов. Цель реализует прием помехового противодействия – самозащита. Подвижный объект представляет собой самонаводящийся ЛА, оборудованный бортовой РИС полуактивного/полупассивного типа. В качестве источника зондирующего сигнала при полуактивном самонаведении выступает станция подсвета цели (ПЦ), излучающая сигнал, несущая частота которого согласована с частотой приемника бортовой полуактивной РИС самонаводящегося ЛА. Используемый диапазон длин волн при этом X : $\lambda = 2 \dots 4$ см. В качестве источника зондирующих сигналов при полупассивном самонаведении выступает станция ПЦ, излучающая два сигнала, один – в диапазоне L : $\lambda = 7 \dots 15$ см (применяется для обнаружения объектов с малой σ), второй, названный провоцирующим зондирующим сигналом (ПЗС), – в диапазоне X : $\lambda = 2 \dots 4$ см. При этом направления излучений зондирующих сигналов диапазонов L и X при полупассивном самонаведении совпадают. Цель, самонаводящиеся ПО и источники зондирующих сигналов располагаются на одной высоте, позволяющей не учитывать влияние земной поверхности на распространение сигналов. Габаритные характеристики приемников (приемных антенн) и качественные характеристики алгоритмов обработки входных сигналов в полуактивной и полупассивной РИС одинаковые. Данные допущения позволяют не учитывать ослабление сигналов в атмосфере и потери при обработке в приемниках. Мощности передатчиков зондирующих

сигналов, в том числе ПЗС, одинаковые и соответствуют средним значениям для существующих станций ПЦ [7]. Предполагается равенство ширины полосы пропускания приемника РИС ширине спектра помех, а также согласованность поляризации антенн станции ПП и приемника РИС ПО.

Обоснование энергетических соотношений

Энергетические соотношения при создании активных помех РИС ПО рассматриваются на примере ретрансляционного передатчика помех, как наиболее часто применяемого. Данный передатчик излучает помеховый сигнал, уровень мощности которого согласован с мощностью принимаемого станцией РТР зондирующего сигнала подавляемой РИС и способен переходить в режим генераторного передатчика.

Определим мощности отраженного от цели зондирующего сигнала P_c и помехи P_{π} для случая противодействия полуактивной РИС, воспользовавшись схемой, представленной на рис. 1 [3]:

$$P_c = \frac{PG}{4\pi D^2} \sigma \frac{G_{\text{РИС}} \lambda^2}{(4\pi d)^2}; \quad (1)$$

$$P_{\pi} = \frac{PG}{4\pi D^2} \frac{G_{\text{РТР}} \lambda^2}{4\pi} G_{\text{ПП}} \frac{G_{\text{РИС}} \lambda^2}{(4\pi d)^2}, \quad (2)$$

где D, d – соответственно удаление станции ПЦ и самонаводящегося ПО от цели; $G_{\text{РИС}}$ – коэффициент усиления антенны РИС ПО в направлении цели; $G_{\text{РТР}}, G_{\text{ПП}}$ – соответственно коэффициенты усиления антенны станций РТР и ПП в направлении ПО.

При действии широкополосной шумовой помехи максимальная дальность обнаружения цели $D_{\text{мп}}$ с требуемыми показателями вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги уменьшается по сравнению с максимальной дальностью обнаружения $D_{\text{м}}$ при отсутствии помехи в K_D раз

$$K_D = D_{\text{мп}} / D_{\text{м}} = 1 / \sqrt[4]{N_{\pi} / N_0}, \quad (3)$$

где N_0, N_{π} – спектральные плотности мощности внутреннего шума приемника РИС и шумовой помехи соответственно.

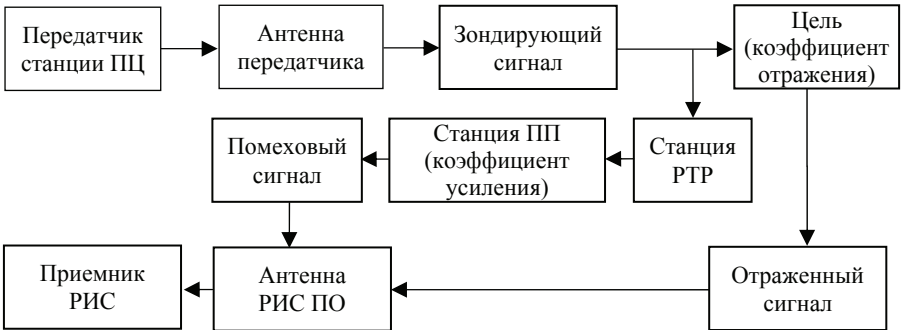


Рис. 1. Схема для определения мощности отраженного от цели зондирующего сигнала и помехи

Определим энергетические соотношения для случая противодействия полупассивной РИС с учетом того, что помеховый сигнал станции ПП, совмещенной с целью, рассматривается в качестве полезного. В данном случае в качестве источника зондирующего сигнала рассматривается передатчик ПЗС. Мощности принимаемого станцией РТР $P_{\text{РТР}}$ и принимаемого РИС ПО $P_{\text{РИС}}$ сигналов будут [8]:

$$P_{\text{РТР}} = \frac{PG G_{\text{РТР}} \lambda^2}{(4\pi)^2 D^2}; \quad (4)$$

$$P_{\text{РИС}} = \frac{P_{\text{ПП}} G_{\text{ПП}} G_{\text{РИС}} \lambda^2}{(4\pi d)^2}. \quad (5)$$

Определение дальности информационного контакта радиолокационных информационных системам подвижных объектов с целью

Соотношения (1) – (5) являются основанием для определения и последующего сравнения потенциальной дальности информационного контакта РИС с целью для полуактивного и полупассивного способов самонаведения ПО. Особенность и отличие реализации ППС ПО заключается в излучении ПЗС в направлении цели по информации от внешних источников, например, от станции ПЦ диапазона L. В данном случае за счет высокой чувствительности станции РТР и функционирования станции ПП цели в соответствии с правилами радиоэлектронного противодействия [9 – 11] следует ожидать увеличения дальности информационного контакта.

Дальности при полуактивном самонаведении ПО при отсутствии $d_{\text{ПА}}$ и наличии $d_{\text{ПАп}}$ помех будут:

$$d_{\text{ПА}} = \sqrt{\frac{PG G_{\text{РИС}} \sigma \lambda^2}{(4\pi)^2 D^2 P_{\text{min}}}}; \quad (6)$$

$$d_{\text{ПАп}} = \sqrt{\frac{PG G_{\text{РИС}} \sigma \lambda^2}{(4\pi)^2 D^2 P_{\text{min}}}} \sqrt{\frac{1}{N_{\text{п}} / N_0}}, \quad (7)$$

где P_{min} – чувствительность приемника РИС ПО при обнаружении сигнала с требуемыми показателями вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги; D – дальность обнаружения цели станцией ПЦ, определяемая в соответствии с основным уравнением радиолокации:

$$D = \sqrt[4]{\frac{PG t_{\text{н}} k_{\text{ип}} G_{\text{прмПЦ}} \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 \alpha_{\text{п}} N_{0\text{ПП}} k_{\text{ш}} q_{\text{тр}}}}, \quad (8)$$

где $t_{\text{н}}$ – длительность когерентного накопления; $k_{\text{ип}}$, $G_{\text{прмПЦ}}$ – соответственно коэффициент использования площади и коэффициент направленного действия приемной антенны станции ПЦ; $k_{\text{ш}}$, $N_{0\text{ПП}}$ – соответственно коэффициент и спектральная плотность внутренних шумов приемника; $\alpha_{\text{п}}$ – обобщенный коэффициент потерь; $q_{\text{тр}}$ – требуемое отношение сигнал/шум при обнаружении.

При ППС ПО дальности по каналу «запроса» $D_{\text{ППз}}$ и каналу «ответа» $D_{\text{ППо}}$ будут:

$$D_{\text{ППз}} = \sqrt{\frac{PG G_{\text{РТР}} \lambda^2}{(4\pi)^2 P_{\text{РТР min}}}}; \quad (9)$$

$$d_{\text{ППО}} = \sqrt{\frac{P_{\text{ПП}} G_{\text{ПП}} G_{\text{РИС}} \lambda^2}{(4\pi)^2 P_{\text{min}}}}, \quad (10)$$

где $P_{\text{РТР min}}$ – чувствительность приемника станции РТР цели.

Определение потенциальных дальностей применимости ПО для различных методов самонаведения

Определение потенциальных дальностей применимости ПО осуществлялось в соответствии с формулами (6) – (10) с учетом следующих обстоятельств. Применение ПО возможно при устойчивом сопровождении входного сигнала, принимаемого РИС, что происходит на дальности меньшей по сравнению с дальностью информационного контакта с целью. При реализации способа ППС ПО удовлетворены основные требования к ПЗС: ПЗС формируется исходя из технических характеристик полупассивной системы самонаведения ПО; ПЗС имитирует один из возможных режимов сопровождения цели РИС, а источник имеет способность к излучению различных ПЗС; ПЗС может быть режимом сопровождения цели или только его имитировать; направление излучения ПЗС может согласовываться с РЛС обнаружения дециметрового и сантиметрового диапазонов. Станция ПП цели функционирует в соответствии с правилами радиоэлектронного противодействия, в том числе обеспечивая мощность помеховых сигналов в месте расположения подавляемой РИС, превышающую на 15 – 20 % мощность отраженных от цели зондирующих сигналов.

Результаты моделирования по формулам (6) – (10) для одинаковых технических характеристик полупассивной и полупассивной РИС ПО показаны на рис. 2.

На рисунке 2, а, б, графики зависимостей соответствующих дальностей от длины волны зондирующего сигнала показаны для наиболее характерных значений эффективной площади рассеяния целей σ , в том числе выполненных по технологии Stealth. На рисунке 2, в, приведены графики зависимостей дальностей по так называемым каналам «запроса» и «ответа». В связи с тем, что в соответствии с сущностью способа ППС станция ПЦ излучает ПЗС в направлении цели без необходимости ее сопровождения, то зависимость дальности по каналу

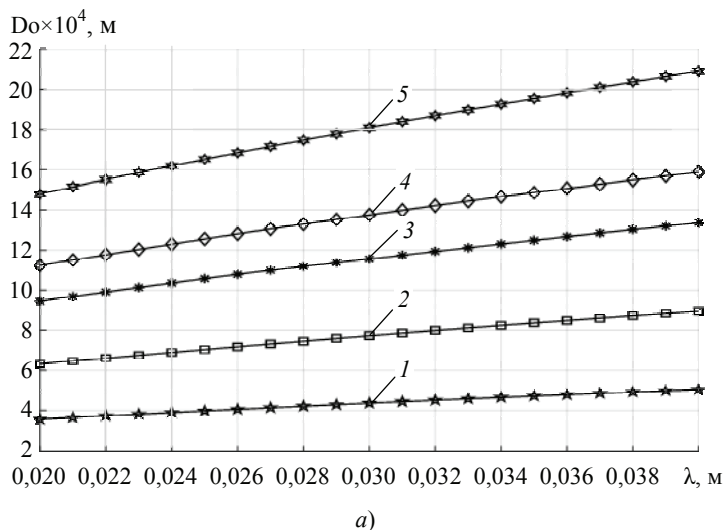


Рис. 2. Дальности обнаружения цели станцией ПЦ (а) (начало):
1 – $\sigma = 0,01$; 2 – $\sigma = 0,1$; 3 – $\sigma = 0,5$; 4 – $\sigma = 1$; 5 – $\sigma = 3$

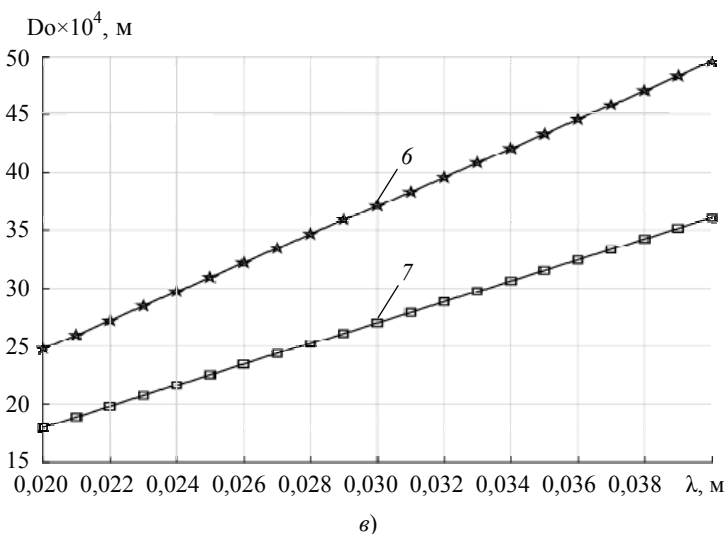
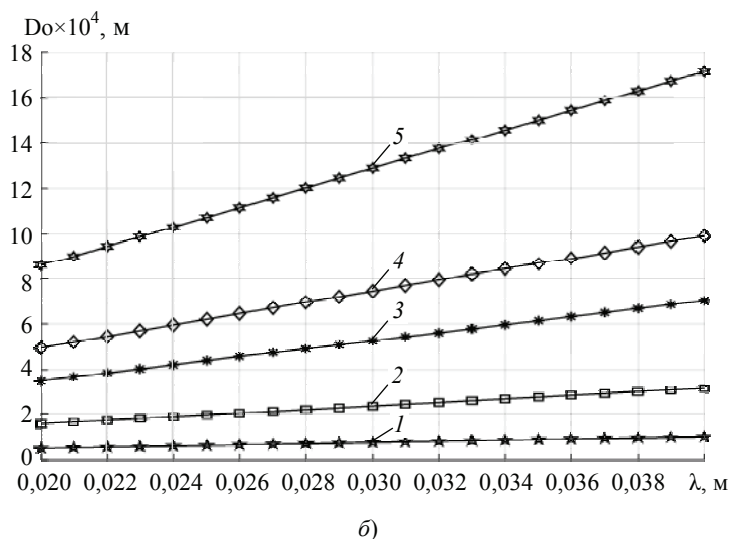


Рис. 2. Дальности полуактивного (б) и полупассивного (е) самонаведения ПО (окончание):
 $1 - \sigma = 0,01$; $2 - \sigma = 0,1$; $3 - \sigma = 0,5$; $4 - \sigma = 1$; $5 - \sigma = 3$; 6 – запрос; 7 – ответ

запроса от σ отсутствует. Также подобная зависимость отсутствует и по каналу ответа из-за того, что слежение в РИС ПО осуществляется за излучаемым станцией ПП помеховым сигналом. Данное обстоятельство в совокупности с различиями распространения электромагнитной энергии при полуактивном и полупассивном способах самонаведения ПО, описываемыми уравнениями радиолокации и противорадиолокации, являются причиной существенно большей дальности ППС ПО.

Закключение

Для одного из наиболее распространенных случаев применения самонавещающегося ПО, указанного в постановке задачи, получены энергетические соотношения при действии активных помех на бортовые РИС и определены потенциальные дальности применимости ПО для полуактивного и вновь разрабатываемо-

го полупассивного методов самонаведения. Дальность применимости относится к числу важнейших характеристик самонаводящихся ПО. Показан высокий потенциал по данному показателю способа ППС ПО. При моделировании учитывались только наиболее существенные факторы влияния. Учет дополнительных факторов, таких как увеличение длины волны и повышение энергетического потенциала станции ПЦ диапазона L, применение генераторного режима постановки помех станцией ПП цели, возможность применения ПО при отличающихся от нуля ракурсах цели и ряд других, будет естественным образом способствовать увеличению дальности применимости по способу ППС. Моделирование выполнено на базе научно-исследовательской лаборатории «Проектирование интеллектуальных информационно-измерительных систем» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет».

Статья подготовлена при поддержке РФФИ, грант № 20-08-00091-а.

Список литературы

1. Широков, Ю. Ф. Основы теории радиолокационных систем : электрон. учеб. пособие. – Текст : электронный / Ю. Ф. Широков. – Самара : Самарский гос. аэрокосмический ун-т им. С. П. Королева, 2012. – URL : <http://repo.ssau.ru/handle/Uchebnye-posobiya/Osnovy-teorii-radiolokacionnyh-sistem-Elektronnyi-resurs-elektron-ucheb-posobie-54211> (дата обращения: 17.04.2020).
2. Меркулов, В. И. Многопозиционные радиолокационные системы управления. Возможности и ограничения / В. И. Меркулов // Радиотехника. – 2013. – № 1. – С. 69 – 72.
3. Перунов, М. Ю. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием / М. Ю. Перунов, К. И. Фомичев, Л. М. Юдин ; под ред. М. Ю. Перунова. – М. : Радиотехника, 2003. – 416 с.
4. Палий, А. И. Радиовойна / А. И. Палий. – М. : Рипол Классик, 2013. – 214 с.
5. Пат. 2181869 Российская Федерация, МПК F41G 7/22, F42B 15/01. Способ полупассивного самонаведения управляемых ракет класса «воздух – воздух» с радиолокационной головкой самонаведения: / В. И. Павлов, А. А. Маштак, Д. В. Зайцев ; заявитель и патентообладатель Тамбовский военный авиационный инженерный институт. – № 2000100556/02 ; заявл. 10.01.2000 ; опубл. 27.04.2002, Бюл. № 12. – 3с.
6. Павлов, В. И. Особенности полупассивного способа самонаведения средств поражения на объекты, выполненные по технологии «Stealth» / В. И. Павлов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2017. – № 1 (96). – С. 119 – 123.
7. Коваливский, А. Бортовые радиолокационные станции России. – Текст : электронный / А. Коваливский // Новый оборонный заказ. Стратегии. – 2017. – № 4 (46). – URL : <https://dfnc.ru/aviazcia/bortovye-radiolokatsionnye-stantsii-rossii/> (дата обращения: 17.04.2020).
8. Помехозащита радиоэлектронных систем управления летательными аппаратами и оружием : монография / В. Н. Лепин, В. Н. Антипов, А. Ю. Викентьев [и др.] ; под ред. В. Н. Лепина. – М. : Радиотехника, 2017. – 416 с.
9. Современная радиоэлектронная борьба. Вопросы методологии / Под ред. В. Г. Радзиевского. – М. : Радиотехника, 2006. – 424 с.
10. Муромцев, Д. Ю. Анализ и синтез радиосистем на множестве состояний функционирования / Д. Ю. Муромцев, Ю. Л. Муромцев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 2. – С. 241 – 251.
11. Савин, Л. В. Сетецентричная и сетевая война. Введение в концепцию / Л. В. Савин. – М. : Евразийское движение, 2011. – 130 с.

Energy Relations under the Active Interference on the Radar Information Systems of Moving Objects

V. I. Pavlov¹, S. V. Artemova², T. Yu. Dorokhova¹, V. V. Aksenov¹

*Department of Design of Electronic and Microprocessor Systems (1),
vpavl@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia;*

*Department of Informatics (2), MIREA – Russian Technological University,
Moscow, Russia*

Keywords: active interference; moving object; radar system; homing.

Abstract: Energy relations are given under the influence of active interference on the radar information systems of moving objects for semi-active and newly developed semi-passive self-guidance methods. On the basis of energy relations, the range of information contact of the means involved in the implementation of homing methods is determined. The prospects of developing a semi-passive homing method for moving objects are indicated.

References

1. <http://repo.ssau.ru/handle/Uchebnye-posobiya/Osnovy-teorii-radiolokacionnyh-sistem-Elektronnyi-resurs-elektron-ucheb-posobie-54211> (accessed 17 April 2020).
2. Merkulov V.I. [Multiposition radar control systems. Possibilities and limitations], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2013, no. 1, pp. 69-72. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Perunov M.Yu. [Ed.], Fomichev K.I., Yudin L.M. *Radioelektronnoye podavleniye informatsionnykh kanalov sistem upravleniya oruzhiyem* [Radio-electronic suppression of information channels of weapon control systems], Moscow: Radiotekhnika, 2003, 416 p. (In Russ.)
4. Paliy A.I. *Radiovoyna* [Radio war], Moscow: Ripol Klassik, 2013, 214 p. (In Russ.)
5. Pavlov V.I., Mashtak A.A., Zaytsev D.V. *Sposob polupassivnogo samonavedeniya upravlyayemykh raket klassa «vozdukh – vozdukh» s radiolokatsionnoy golovkoy samonavedeniya* [Semi-passive homing of guided air-to-air missiles with a homing radar], Russian Federation, 2002, Pat. 2181869. (In Russ.)
6. Pavlov V.I. [Features of a semi-passive method of homing weapons on objects made using the Stealth technology], *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences], 2017, no. 1 (96), pp. 119-123. (In Russ., abstract in Eng.)
7. <https://dfnc.ru/aviazcia/bortovye-radiolokatsionnye-stantsii-rossii/> (accessed 17 April 2020).
8. Lepin V.N. [Ed.], Antipov V.N., Vikent'yev A.Yu., Koltyshev Ye.Ye., Mukhin V.V., Trushchinskiy A.Yu., Frolov A.Yu., Yankovskiy V.T. *Pomekhozashchita radioelektronnykh sistem upravleniya letatel'nyimi apparatami i oruzhiyem: monografiya* [Interference protection of electronic control systems for aircraft and weapons: monograph], Moscow: Radiotekhnika. 2017, 416 p. (In Russ.)
9. Radziyevskiy V.G. [Ed.] *Sovremennaya radioelektronnaya bor'ba. Voprosy metodologii* [Modern electronic warfare. Methodological issues], Moscow: Radiotekhnika, 2006, 424 p. (In Russ.)
10. Muromtsev D.Yu., Muromtsev Yu.L. [Analysis and synthesis of radio systems on a set of functioning states], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 2, pp. 241-251. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Savin L.V. *Setetsentrichnaya i setevaya voyna. Vvedeniye v kontseptsuyu* [Network-centric and network warfare. Introduction to the concept], Moscow: Yevraziyskoye dvizheniye, 2011, 130 p. (In Russ.)

Energetische Verhältnisse bei aktiver Interferenz auf Radarinformationssysteme der beweglichen Objekte

Zusammenfassung: Es sind die energetischen Verhältnisse unter dem Einfluss aktiver Interferenzen auf die Radarinformationssysteme beweglicher Objekte für semi-aktive und neu entwickelte semi-passive Selbstannäherungsmethoden angegeben. Auf der Grundlage von Energiebeziehungen wird die Reichweite des Informationskontakts der Mittel bestimmt, die an der Implementierung von Selbstannäherungsverfahren beteiligt sind. Die Aussichten für die Entwicklung eines semi-passiven Verfahrens der Selbststeuerung von beweglichen Objekten sind angegeben.

Rapports énergétiques lors de l'action des interférences actives sur les systèmes informatiques de localisation radio des objets mobiles

Résumé: Sont mentionnés les rapports énergétiques lors de l'action des interférences actives sur les systèmes informatiques à radar des objets mobiles pour les méthodes semi-actives et nouvellement développées semi-passives d'autoguidage. A la base des rapports énergétiques, est déterminée la portée du contact informatique des moyens impliqués dans la mise en œuvre des méthodes d'autoguidage. Sont indiquées les perspectives de l'élaboration d'une méthode semi-passive d'autoguidage des objets mobiles.

Авторы: *Павлов Владимир Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; *Артемова Светлана Валерьевна* – доктор технических наук, профессор кафедры информатики института комплексной безопасности и специального приборостроения, ФГБОУ ВО МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия; *Дорохова Татьяна Юрьевна* – кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Аксенов Виктор Владимирович* – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Шамкин Валерий Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ

В. А. Немтинов¹, В. Ю. Бобылев¹,
Ю. В. Немтинова^{1,2}, А. Б. Борисенко¹

*Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» (1),
kafedra@mail.gaps.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ»;
кафедра менеджмента, маркетинга и рекламы (2), jnemtinova@hotmail.com;
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина»,
Тамбов, Россия*

Ключевые слова: информационная поддержка; принятие решений; технологическое обслуживание; токарный станок 16K20.

Аннотация: Рассмотрены вопросы информационной поддержки принятия решений при проведении технологического обслуживания токарных станков перед началом и в ходе выполнения технологических операций, обеспечивающих высокое качество изготовления детали, способствующих повышению эффективности производства: увеличению сменной производительности на 15 – 17 %; сокращению простоев станочного оборудования до 10 %. Разработана информационно-логическая модель поддержки принятия решений, позволяющая в зависимости от текущего состояния узлов и деталей станка и заданных требований к изготовлению деталей предложить оптимальный вариант проведения технологического обслуживания и наладки токарных станков. Программная реализация информационно-логической модели осуществлена в среде экспертной системы CLIPS, основу составляет объектно-ориентированный язык COOL. Апробация модели выполнена на примере реализации мероприятий при проведении технологического обслуживания токарного станка 16K20.

Введение

Изобретенный в 650 году до н.э. токарный станок претерпел революционные изменения и в наше время является неотъемлемым оборудованием любого машиностроительного производства. Рассматривая данный вид оборудования с точки зрения надежности, следует отметить, что он является сложной технической системой с жесткими обратными связями и состоит из механической и электрической составляющих. Для него характерно ухудшение технических параметров в процессе эксплуатации, что выражается в естественном изменении геометрии, как таковой, то есть детали токарного станка, подвергаясь механическим и эрозионным воздействиям, в течение времени меняются в размерах. В результате чего их взаиморасположение в пространстве не соответствует проектной документации, а параллельности в конструкции нарушаются, что, безусловно, сказывается на жесткости станка в целом, его отдельных элементов и приводит к поломкам токарного станка.

Самому сильному физическому воздействию подвергаются в первую очередь движущие элементы – гидравлические системы и электрические привода. Следует отметить, что гидравлика является основным «больным» местом в любом токарном станке. Причина поломок гидравлики, как правило, в невысокой надежности уплотнителей, прокладок и сальников. В результате этого техническое масло начинает течь, попадая на пол, вызывая опасность для работника, или в бак смазочно-охлаждающей жидкости (**СОЖ**). Смазочно-охлаждающая жидкость при этом густеет, плохо прокачивается, вследствие чего инструмент перегревается, оказывает более жесткое воздействие на обрабатываемую деталь, провоцируя перегрев и даже поломку электропривода [1].

В российских машинах всех типов наиболее часто возникают всевозможные люфты, дробления, вибрации, отрицательно сказывающие на качестве обработки детали или делающие невозможной работу станка.

Внезапно возникающие нагрузки на электродвигатель при выполнении токарных работ приводят к поломкам в электрошитах. Кроме того, заливаемое масло не всегда соответствует предъявляемым требованиям (может быть более вязким, в том числе и по причине холода в производственном помещении), и, как следствие, не обеспечивает в токарном станке качественную централизованную смазку, увеличивая износ трущихся поверхностей, провоцируя перегрев насосов, заклинивание и разрушение узлов станка.

Кроме гидравлики и электродвигателей, являющих зоной риска работоспособности токарных станков, следует акцентировать внимание на «движущей» механике – подшипниках качения и зубчатых передачах. В результате влияния высокочастотной вибрации возможны процессы задевания и кавитации. Если, например, в коробке передач на зубчатых колесах имеются дефекты, то велика вероятность задевания и заклинивания, что может привести к выходу из строя соответствующей пары.

Следует отметить, что какое бы совершенное станочное оборудование не выпускалось, операции по его регулировке, настройке и контролю за технологическими параметрами будут присутствовать всегда. Это связано и с износом рабочих органов, и различием технологий изготовления деталей. Поэтому специалистам по техническому обслуживанию нужны глубокие знания не только по конструкции, теории производственных процессов в токарных станках, но и умение выполнять регулировку и настройку в зависимости от свойств и состояния обрабатываемого материала, технического состояния, износа деталей, узлов и механизмов [1].

В работе рассмотрены вопросы разработки информационно-логической модели (**ИЛМ**) поддержки принятия решений при проведении технологического обслуживания и наладки токарных станков перед началом и в ходе выполнения технологических операций.

Технические требования к токарным станкам

Для качественного выполнения всех токарных работ необходима тщательная подготовка и наладка станочного оборудования. Если эти работы проведены хорошо и в оптимальные сроки, с соблюдением всех правил, это положительно скажется на готовой детали. Некачественно выполненные токарные работы – неисправимый в большинстве случаев брак.

Профессиональная токарная обработка требует большого внимания буквально к каждому узлу агрегата, их верной настройки перед началом работы. Малейшие отклонения от требований провоцируют различные варианты дефектов, и конкретно: смещенная ось отверстия; элемент в форме конуса; сильная шероховатость поверхности детали; заготовка раздробилась и т.д.

Для формирования перечня мероприятий при проведении технологического обслуживания токарного оборудования необходимо руководствоваться основными документами, регламентирующими проведение проверки, регулировки и настройки; инструкций по эксплуатации заводов изготовителей, технических условий на отдельные узлы и механизмы. При этом основными критериями качества являются следующие: безопасность и легкость обслуживания; эксплуатационная надежность; производительность; материалоемкость; технологичность; точность работы; себестоимость; уровень эксплуатационных расходов. Точность работы станка должна соответствовать в течение всего срока его службы заданным показателям точности (допускам) размеров и формы обработанных на нем деталей. Эксплуатационная точность станка определяется его геометрической кинематической и динамической точностями, то есть способностью достаточно устойчиво сохранять свою форму и размеры неизменными при действии наибольших сил резания, веса обрабатываемой заготовки и вызываемых ими реактивных сил и моментов. Требуемая точность работы станка достигается правильной его компоновкой, достаточными жесткостью узлов и целого станка и виброустойчивостью. Эксплуатационную надежность станка, как и всякой другой системы, можно определить, как способность обеспечить выполнение задания в установленном объеме, обусловленную главным образом безотказностью и ремонтпригодностью. Количественно надежность должна определяться вероятностными характеристиками и параметрами. Эксплуатационная надежность станка практически зависит как от его конструкции, в частности от степени сложности его кинематической структуры и технологичности, так и, в еще большей степени, от качества изготовления и сборки.

Не соблюдение этих и других требований приводит к снижению качества токарных работ и производительности агрегатов.

Разработка информационно-логической модели поддержки принятия решений

Основным элементом системы поддержки принятия решения при проведении технологического обслуживания токарного оборудования перед началом и в ходе выполнения технологических операций является информационно-логическая модель (ИЛМ). В общем виде ИЛМ поддержки принятия решений представляет собой объединение множеств данных и связей между ними в виде правил. Отдельное продукционное правило, содержащееся в базе знаний, состоит из двух частей [2 – 7]: условной, состоящей из элементарных предложений, соединенных логическими связками «и», «или», и заключения, включающего в себя одно или несколько предложений, выражающих либо некоторый факт, либо указание на определенное действие, подлежащее исполнению.

Таким образом, ИЛМ может быть представлена следующим кортежем

$$M = (d_1, \dots, d_i, \dots, d_N, p_1, \dots, p_j, \dots, p_S),$$

где M – оператор ИЛМ; $d_1, \dots, d_N$ – множество данных ИЛМ; $p_1, \dots, p_S$ – множество правил.

В свою очередь правила, входящие в модель, построены по типу: *если ... «условия выполняются», то ... «реализация следствия»* [8 – 12.]

Рассмотрим правила, на основе которых должны приниматься решения по формированию перечня мероприятий технологического обслуживания токарного станка перед началом и в ходе выполнения технологических операций. Они собраны экспертами [13 – 16] и авторами в процессе контактов с наладчиками токарного оборудования.

В настоящее время база содержит более 90 производственных правил, с помощью которых может быть сформирован оптимальный перечень мероприятий технологического обслуживания токарного оборудования.

Ниже приведен пример правил применительно к универсальным токарно-винторезным станкам на примере 16К20 (рис. 1).

а) *Правила выбора мероприятий при устранении брака при работе на токарном станке 16К20:*

– если «брак при обтачивании цилиндрических поверхностей» = «часть поверхности детали осталась необработанной», то «неверные размеры заготовки» = «осматривать заготовку и проверять сомнительные размеры»;

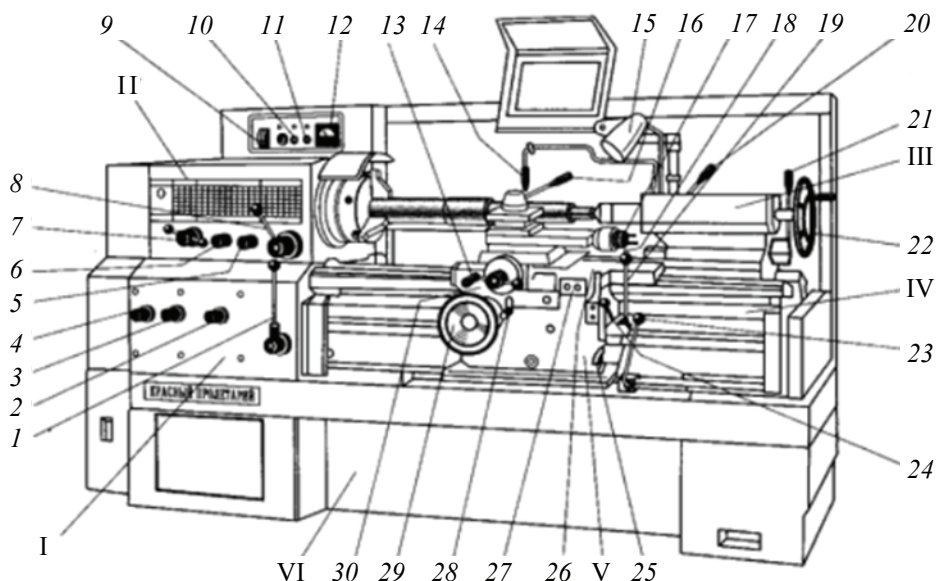


Рис. 1. Схема токарно-винторезного станка 16К20 и органов его управления:

основные узлы токарно-винторезного станка модели 16К20:

I – коробка подач 16К20; II – передняя бабка с коробкой скоростей;

III – задняя бабка; IV – станина; V – суппорт; VI – основание;

органы управления токарного станка по металлу 16К20:

1, 23 – рукоятка управления фрикционной муфтой главного привода; 2 – рукоятка установки величины подачи и шага резьбы и отключения механизма коробки подач; 3 – рукоятка установки подачи и типа нарезаемой резьбы; 4 – рукоятка установки величины подачи и шага резьбы; 5 – рукоятка установки правой и левой резьбы; 6 – рукоятка установки нормального или увеличенного шага резьбы и положения при делении многозаходных резьб; 7, 8 – рукоятка установки частоты вращения шпинделя; 9 – переключатель вводный автоматический; 10 – сигнальная лампа; 11 – переключатель электронасоса подачи охлаждающей жидкости; 12 – указатель нагрузки станка; 13 – рукоятка ручного перемещения поперечных салазок суппорта; 14 – регулируемое сопло подачи охлаждающей жидкости; 15 – лампы местного освещения кнопки; 16 – рукоятка поворота и зажима резцедержателя; 17 – рукоятка ручного перемещения верхних салазок суппорта; 18 – переключатель включения электродвигателя привода ускоренной подачи каретки и поперечных салазок суппорта; 19 – рукоятка управления перемещениями каретки и поперечных салазок суппорта; 20, 21 – рукоятки зажима пиноли задней бабки и ее крепления к станине соответственно; 22 – переключатель перемещения пиноли задней бабки; 24 – рукоятка включения и выключения разъемной гайки ходового винта; 25 – рукоятка включения подачи; 26 – болт закрепления каретки на станине; 27 – кнопочная станция включения и выключения электродвигателя главного привода; 28 – рукоятка включения и выключения ременной шестерни; 29 – переключатель ручного перемещения каретки; 30 – переключатель золотника смазки направляющих каретки и поперечных салазок суппорта

– если «брак при обтачивании цилиндрических поверхностей» = «часть поверхности детали осталась необработанной», то «неправильная установка заготовки» = «проверить правильность установки заготовки»;

– если «брак при обтачивании цилиндрических поверхностей» = «часть поверхности детали осталась необработанной», то «неточное расположение центровых отверстий» = «следить за правильным расположением центровых отверстий»;

– если «брак при обтачивании цилиндрических поверхностей» = «размеры обточенной поверхности неверны, то есть диаметр больше нужного», то «неточная установка резца на глубину резания» = «проверить глубину резания и повторно обточить до нужного диаметра»;

– если «брак при обтачивании цилиндрических поверхностей» = «обточенная поверхность получилась конической», то «смещение заднего центра относительно переднего» = «правильно установить задний центр»;

– если «брак при обтачивании цилиндрических поверхностей» = «обточенная поверхность получилась овальной», то «биение шпинделя» = «замена подшипников и шеек»;

– если «брак при обтачивании цилиндрических поверхностей» = «обточенная поверхность получилась овальной», то «биение переднего центра» = «очистка переднего центра и конического отверстия шпинделя»;

– если «брак при обтачивании цилиндрических поверхностей» = «обточенная поверхность получилась нечистой», то «большая подача резца» = «проверить правильность выбора подачи, провести чистовую обработку»;

– если «брак при подрезании торцов и уступов» = «часть поверхности торца или уступа осталась необработанной», то «неправильная установка резца по длине детали или по высоте центров» = «проверка правильности установки детали и резца»;

– если «брак при подрезании торцов и уступов» = «неперпендикулярное расположение торца или уступа к оси детали», то «неправильная установка резца» = «проверка правильности установки резца»;

– если «брак при вытачивании канавок и отрезании» = «неверное расположение канавки по длине детали», то «неправильная разметка места под канавку» = «внимательная разметка рисок под канавки»;

– если «брак при вытачивании канавок и отрезании» = «ширина канавки меньше требуемой», то «ширина резца выбрана неверно» = «исправить брак дополнительным вытачиванием»;

– если «брак при вытачивании канавок и отрезании» = «глубина канавки меньше требуемой», то «неправильная длина прохода резца» = «доточить до требуемой глубины»;

– если «брак при сверлении» = «увод сверла», то «работа велась длинным сверлом» = «необходимо произвести предварительные надсверливания отверстия коротким сверлом того же диаметра»;

– если «брак при сверлении» = «увод сверла», то «неправильно заточенное сверло» = «предварительная проверка заточки сверла шаблонами, при необходимости перезаточить сверло»;

– если «брак при сверлении» = «увод сверла при сверлении металла, который имеет раковины или содержит твердые включения», то «необходимо уменьшить подачу»;

– если «брак при растачивании отверстий» = «отверстие получилось некруглым (овальным или с огранкой)», то «излишне сильный зажим детали в кулачках патрона» = «необходим более легкий зажим с уменьшением глубины резания и подачи» [15].

б) *Правила выбора мероприятий при неисправности шпинделя на токарном станке 16К20:*

– если «неисправность шпинделя» = «повышенное радиальное биение», то «изогнутость рабочего вала» = «правка вала шпинделя»;

– если «неисправность шпинделя» = «повышенное радиальное биение», то «недостаточная затяжка подшипников, зазоры» = «регулировка подшипников, подтяжка гайки затяжки подшипников»;

– если «неисправность шпинделя» = «шум в верхнем подшипнике», то «диагностика подшипника» = «промывка подшипника от грязи с заменой смазки или замена подшипника» [16].

в) *Правила выбора мероприятий при разных неисправностях:*

– если «неисправность станка» = «станок не запускается», то «падение или отсутствие напряжения питающей сети» = «проверить наличие и величину напряжения в сети»;

– если «неисправность станка» = «произвольное отключение электродвигателя во время работы», то «срабатывание теплового реле от перегрузки двигателя» = «уменьшить скорость резания или подачу»;

– если «неисправность станка» = «произвольное отключение электродвигателя во время работы», то «недостаточное натяжение ремней» = «увеличить натяжение ремней»;

– если «неисправность станка» = «не вращается диск маслоуказателя», то «нет масла в системе» = «залить масло»;

– если «неисправность станка» = «не вращается диск маслоуказателя», то «засорился один из фильтров» = «очистить фильтр»;

– если «неисправность станка» = «насос охлаждения не работает», то «недостаток жидкости» = «долить жидкость»;

– если «неисправность станка» = «насос охлаждения не работает», то «перегорели предохранители» = «заменить предохранителя»;

– если «неисправность станка» = «станок вибрирует», то «неправильная установка станка на фундаменте» = «выверить станок»;

– если «неисправность станка» = «станок вибрирует», то «износ стыка направляющих суппорта» = «подтянуть прижимные планки и клинья»;

– если «неисправность станка» = «крутящий момент шпинделя меньше указанного в руководстве», то «слабо затянута фрикционная муфта» = «увеличить затяжку муфты»;

– если «неисправность станка» = «усилие подачи суппорта меньше указанного в руководстве», то «недостаточно затянута пружина перегрузочного устройства» = «подтянуть пружину» [16].

Программная реализация информационно-логической модели осуществлена в среде экспертной системы CLIPS, основу составляет полноценный объектно-ориентированный язык COOL.

Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований разработана информационно-логическая модель поддержки принятия решений при проведении обслуживания токарного оборудования перед началом и в ходе выполнения технологических операций, позволяющая в зависимости от текущего состояния узлов и деталей станка и заданных требований к изготовлению деталей предложить оптимальный вариант мероприятий. Ее апробация, выполненная при обслуживании токарных станков, способствовала повышению эффективности производства: высокому качеству готовой детали, уменьшению брака до 5 %; увеличению сменной производительности на 15 – 17 %; сокращению простоев по техническим причинам до 10 %.

Список литературы

1. Ситников А. «Слабые места» отечественных токарных станков. – Текст : электронный / А. Ситников // Equipnet.ru. – URL : https://www.equipnet.ru/articles/tech/tech_411.html (дата обращения 14.04.2020).
2. Nemtinov, V. Automation of the Early Stages of Plating Lines Design / V. Nemtinov, N. Bolshakov, Yu. Nemtinova // MATEC Web of Conferences : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017), 11 – 15 September, 2017, Sevastopol. – 2017. – Vol. 129. – P. 01012.
3. Решение проблемы оптимального синтеза технологических процессов сложных систем / Е. Н. Малыгин, В. А. Немтинов, Ж. Е. Зимнухова, Ю. В. Немтинова // Вестн. Тамб. ун-та. Серия: Естественные и технические науки. – 2002. – Т. 7, № 2. – С. 242 – 245.
4. Рыбина, Г. В. Применение интеллектуального анализа данных для построения баз знаний интегрированных экспертных систем / Г. В. Рыбина // Авиакосмическое приборостроение. – 2012. – № 11. – С. 36 – 53.
5. Мокрозуб, В. Г. Постановка задачи разработки математического и информационного обеспечения процесса проектирования многоассортиментных химических производств / В. Г. Мокрозуб, Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 252 – 264. doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.252-264
6. Мокрозуб, В. Г. Информационно-логические модели технических объектов и их представление в информационных системах / В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов, С. Я. Егоров // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2010. – № 3. – С. 68 – 73.
7. Мокрозуб, В. Г. Системный анализ процессов принятия решений при разработке технологического оборудования / В. Г. Мокрозуб, Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 364 – 373. doi: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.364-373
8. Краснянский, М. Н. Математическое моделирование адаптивной системы управления профессиональным образованием / М. Н. Краснянский, А. И. Попов, А. Д. Обухов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 196 – 208. doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.196-208
9. Nemtinov, K. Rationale Construction of Individual Elements of Technological Complex / K. Nemtinov, A. Eruslanov, Yu. Nemtinova // MATEC Web of Conferences : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018), 10 – 14 September, 2018, Sevastopol. – 2018. – Vol. 224. – P. 02036
10. Nemtinov, V. A. On an Approach to Designing a Decision Making System for State Environmental Examination / V. A. Nemtinov, Yu. V. Nemtinova // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2005. – Vol. 44, No. 3. – P. 389 – 398.
11. Mokrozub, V. G. An Approach to Smart Information Support of Decision-Making in the Design of Chemical Equipment / V. G. Mokrozub, V. A. Nemtinov // Chemical and Petroleum Engineering. – 2015. – Vol. 51, No. 7. – P. 487 – 492. doi: 10.1007/s10556-015-0074-4
12. Mokrozub, V. G. Procedural Model for Designing Multiproduct Chemical Plants / V. G. Mokrozub, V. A. Nemtinov, A. V. Mokrozub // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – Vol. 53, No. 5-6. – P. 326 – 331. doi: 10.1007/s10556-017-0342-6
13. Analysis of Decision-Making Options in Complex Technical System Design / V. A. Nemtinov, A. N. Zazulya, V. P. Kapustin, Yu. V. Nemtinov // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1278 (1). – P. 012018.

14. Бруштейн, Б. Е. Основы токарного дела / Б. Е. Бруштейн, В. И. Дементьев. – 4-е изд., доп. – М. : Профтехиздат, 1962. – 328 с.

15. Неисправности шпинделя и способы их устранения (список проблем и решений). – Текст : электронный // CNC Motors. – URL : <http://cncmotors.ru/articles/neispravnosti-shpindelya-i-sposoby-ix-ustraneniya-spisok-problem-i-reshenij/> (дата обращения 14.04.2020).

16. 1к62 ремонт станка. – Текст : электронный // Stanoktehpasport.ru. – URL : <http://www.stanoktehpasport.ru/1k62-remont-stanka> (дата обращения 14.04.2020).

Information Decision Making Support for Technological Maintenance of Lathes

V. A. Nemtinov¹, V. Yu. Bobylev¹,
Yu. V. Nemtinova^{1,2}, A. B. Borisenko¹

*Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering (1),
kafedra@mail.gaps.tstu.ru; TSTU;*

*Department of Management, Marketing and Advertising (2), jnemtina@hotmail.com;
Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia*

Keywords: information support; decision making; technological service; Lathe 16K20.

Abstract: The issues of information support for decision-making during technological maintenance of lathes before and during the execution of technological operations that provide high quality parts, contributing to an increase in production efficiency: the increase of shift productivity by 15 - 17%; reduction in machine equipment downtime by 10%. An information-logical model of decision-making support has been developed, which, depending on the current state of machine components and parts and given requirements for the manufacture of parts, offers the best option for technological maintenance and commissioning of lathes. The software for the information-logical model is implemented in the environment of the CLIPS expert system, the basis is the COOL object-oriented language. The model was tested on the example of the implementation of measures during technological maintenance of a 16K20 lathe.

References

1. https://www.equipnet.ru/articles/tech/tech_411.html (accessed 14 April 2020).
2. Nemtinov V., Bolshakov N., Nemtinova Yu. MATEC Web of Conferences: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017), 11 - 15 September, 2017, Sevastopol, 2017, vol. 129, p. 01012.
3. Malygin Ye.N., Nemtinov V.A., Zimnukhova Zh.Ye., Nemtinova Yu.V. [The solution to the problem of optimal synthesis of technological processes of complex systems], *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki* [Bulletin of the Tambov University. Series: Natural and Technical Sciences], 2002, vol. 7, no. 2, pp. 242-245. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Rybina G.V. [Application of data mining for building knowledge bases of integrated expert systems], *Aviakosmicheskoye priborostroyeniye* [Aerospace Instrumentation], 2012, no. 11, pp. 36-53. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Mokrozub V.G., Malygin Ye.N., Karpushkin S.V. [Statement of the problem of developing mathematical and information support for the design process of multi-assorted chemical productions], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 252-264, doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.252-264 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Mokrozub V.G., Nemtinov V.A., Yegorov S.Ya. [Information-logical models of technical objects and their representation in information systems], *Informatsionnyye tekhnologii v proyektirovanii i proizvodstve* [Information technologies in design and production], 2010, no. 3, pp. 68-73.
7. Mokrozub V.G., Malygin Ye.N., Karpushkin S.V. [A system analysis of decision-making processes during the development of technological equipment], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 3, pp. 364-373, doi: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.364-373 (In Russ., abstract in Eng.)
8. Krasnyanskiy M.N., Popov A.I., Obukhov A.D. [Mathematical modeling of the adaptive management system of vocational education], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 196-208, doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.196-208 (In Russ., abstract in Eng.)
9. Nemtinov K., Eruslanov A., Nemtinova Yu. MATEC Web of Conferences: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018), 10 - 14 September, 2018, Sevastopol, 2018, vol. 224, P. 02036.
10. Nemtinov V.A., Nemtinova Yu.V. On an Approach to Designing a Decision Making System for State Environmental Examination, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2005, vol. 44, no. 3, pp. 389-398.
11. Mokrozub V.G., Nemtinov V.A. An Approach to Smart Information Support of Decision-Making in the Design of Chemical Equipment, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2015, vol. 51, no. 7, pp. 487-492, doi: 10.1007/s10556-015-0074-4
12. Mokrozub V.G., Nemtinov V.A., Mokrozub A.V. Procedural Model for Designing Multiproduct Chemical Plants, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2017, vol. 53, no. 5-6, pp. 326-331, doi: 10.1007/s10556-017-0342-6
13. Nemtinov V.A., Zazulya A.N., Kapustin V.P., Nemtinov Yu.V. Analysis of Decision-Making Options in Complex Technical System Design, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1278 (1), p. 012018.
14. Brushteyn B.Ye., Dement'yev V.I. *Osnovy tokarnogo dela* [Fundamentals of turning business], Moscow: Proftekhizdat, 1962, 328 p. (In Russ.)
15. <http://cncmotors.ru/articles/neispravnosti-shpindelya-i-sposoby-ix-ustraneniya-spisok-problem-i-reshenij/> (accessed 14 April 2020).
16. <http://www.stanoktehpasport.ru/1k62-remont-stanka> (accessed 14 April 2020).

Informationsunterstützung der Entscheidungsfindung bei der Durchführung der technologischen Wartung der Drehmaschinen

Zusammenfassung: Es sind die Fragen der Informationsunterstützung für die Entscheidungsfindung bei der technologischen Wartung von Drehmaschinen vor und während der Ausführung von technologischen Vorgängen, die eine qualitativ hochwertige Verarbeitung des Teils gewährleisten und zur Steigerung der Produktionseffizienz beitragen, betrachtet: Steigerung der Schichtproduktivität um 15 bis 17%; Reduzierung der Ausfallzeiten der Maschinenausrüstung um 10%. Es ist ein informationslogisches Modell zur Entscheidungsunterstützung entwickelt, das je nach aktuellem Zustand der Maschinenkomponenten und -teile und den vorgegebenen Anforderungen an die Teilefertigung die beste Option für die technologische Wartung

und Inbetriebnahme von Drehmaschinen bietet. Die Software-Implementierung des informationslogischen Modells erfolgt in der Umgebung des CLIPS-Expertensystems, die Grundlage bildet die objektorientierte Sprache COOL. Das Modell ist am Beispiel der Implementierung von Maßnahmen während der technologischen Wartung der 16K20-Drehmaschine getestet worden.

Soutient informatique de la prise des décisions en matière de la maintenance technique des tours

Résumé: Sont examinées les questions d'appui de la prise des décisions lors de la maintenance technologique des tours avant et pendant les opérations technologiques assurant une haute qualité de la fabrication de la pièce, contribuant à une augmentation de l'efficacité de la production: augmentation de la productivité de remplacement de 15 à 17 %; réduction des temps d'arrêt des machines – outils jusqu'à 10 %. Est élaboré un modèle informatique et logique d'aide à la décision, permettant en fonction de l'état actuel des composants et des pièces de la machine et des exigences de la fabrication spécifiées pour les pièces, de proposer la meilleure option pour la maintenance technologique et la mise en place de tours. La mise en œuvre du modèle informatique et logique est réalisée dans l'environnement du système expert CLIPS, la base duquel est le langage COOL. La validation du modèle est réalisée à l'exemple de la mise en œuvre des mesures lors de la maintenance technologique du tour 16k20.

Авторы: *Немтинов Владимир Алексеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Бобылев Владислав Юрьевич* – магистрант; *Немтинова Юлия Владимировна* – кандидат экономических наук, старший научный сотрудник кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ»; доцент кафедры менеджмента, маркетинга и рекламы, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина»; *Борисенко Андрей Борисович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Мокрозуб Владимир Григорьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ СОСТОЯНИЯ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

Е. И. Алгазин

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

Ключевые слова: система автоматики; собственное время электрической цепи; фазовая плоскость; электрическая цепь.

Аннотация: Предложен способ оценки устойчивости состояния линейных систем автоматики на основе анализа картины фазовой плоскости. Рассмотрено аналитическое выражение временно-энергетической модели и ее производной, на основе которых получены картины фазовой плоскости для затухающей экспоненциально-и расходящейся синусоид.

Введение

Существующие способы анализа и описания устойчивости состояния линейных систем применимы для их анализа и описания в области времени.

В данной работе в качестве линейных систем автоматики рассмотрены обычные $R-L-C$ цепи без источника питания в режимах затухания колебаний и-расходящегося процесса. В соответствие таким режимам предложены временно-энергетические модели цепей.

Способ анализа процесса, происходящего в цепи, сводится к анализу картины, полученной на фазовой плоскости. Такой картиной, как правило, может служить расходящаяся из центра (начала координат) спираль. Этому случаю соответствует расходящийся процесс. Если спираль сходится в центр, то это сходящийся (затухающий) процесс.

Данный способ оценки состояния линейных систем позволяет количественно и качественно проанализировать происходящие в них процессы.

Постановка задачи

Представим линейную систему в виде последовательной $R-L-C$ цепи без источника питания [1]. В такой цепи сопротивление $R = 2$ Ом, индуктивность $L = 6$ нГн, емкость $C = 1$ Ф, предварительно заряжена до 100 В. Очевидно, в ней будет действовать колебательный процесс, описываемый в виде экспоненциально затухающей синусоиды в цепи $R-L-C$.

Необходимо получить аналитические выражения временно-энергетических моделей цепи $R-L-C$ в затухающем и расходящемся процессах и проиллюстрировать полученные данные о них в виде картины по фазовой плоскости.

Пути решения

На рисунке 1 предложена геометрическая интерпретация временно-энергетической модели, отображающая поведение R–L–C цепи без источника питания с предварительно заряженным конденсатором [2].

Рассмотрим колебательный разряд конденсатора как наиболее сложный. Будем полагать, что положительное направление оси времени соответствует передаче энергии в конденсатор.

Пусть колебательный процесс в цепи описывается следующими аналитическими выражениями в области времени [2]:

$$t_i(E) = T_0 e^{-\alpha \frac{(E_{\max} - i\Delta E)}{E_{\max}}} \cos \left(2\pi\alpha \frac{(E_{\max} - i\Delta E)}{E_1} \right), \quad (1)$$

где t_i – i -й мгновенный отсчет времени, рассматриваемый как функция от энергии; T_0 – собственное время цепи R–L–C (то есть время, пока в такой цепи есть энергия); α – коэффициент затухания; $E_{\max}$ – максимальное значение энергии в цепи R–L–C; ΔE – шаг по энергии; E_1 – период колебаний энергии в цепи R–L–C.

Для построения картины на фазовой плоскости необходимо иметь производную от выражения (1). Пусть это будет переменная

$$dtk01(\Delta E) = \frac{d}{d\Delta E} tk01(\Delta E), \quad (2)$$

где

$$tk01(\Delta E) = T_0 e^{-\alpha \frac{(E_{\max} - \Delta E)}{E_{\max}}} \cos \left(2\pi\alpha \frac{(E_{\max} - \Delta E)}{E_1} \right), \quad (3)$$

и переменные, представленные в формуле (1).

Для получения картины расходящегося процесса необходимо в выражении (3) изменить знак у коэффициента затухания α .

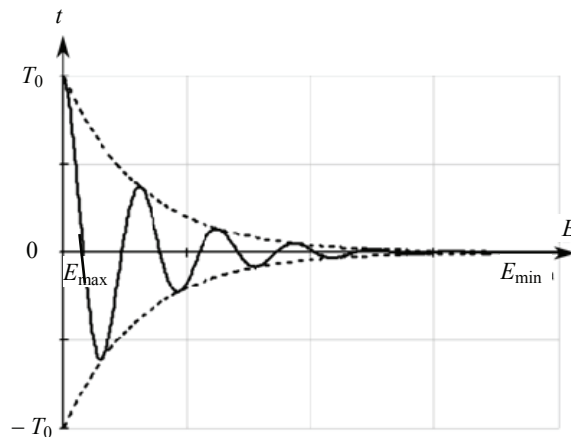


Рис. 1. Геометрическая интерпретация временно-энергетической модели цепи R–L–C без источника питания

Результаты

Результаты проведенного исследования приведены на рис. 2.

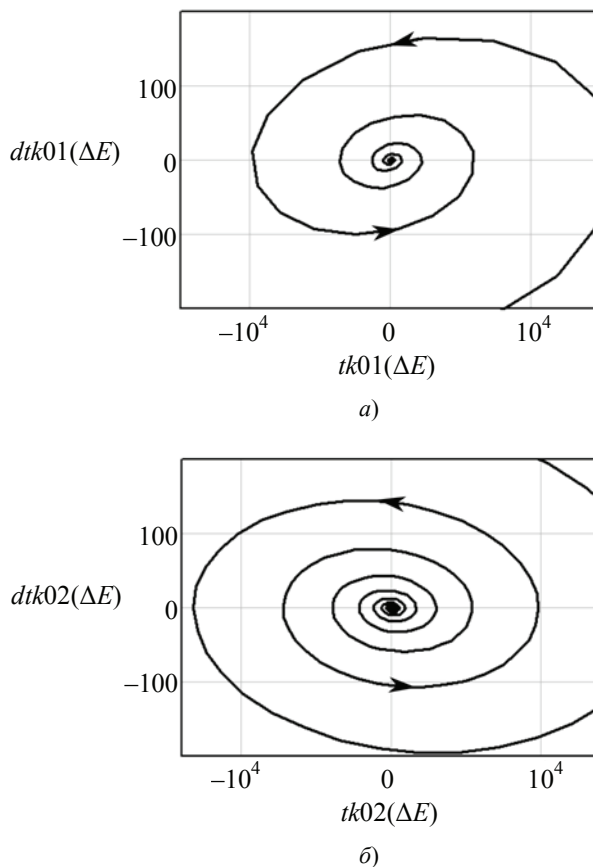


Рис. 2. Картина на фазовой плоскости, соответствующая затухающему (а) и колебательному (б) процессам в области времени

Выводы

По результатам исследования видно, что для анализа и описания состояния линейных систем автоматики в области времени, как функции от энергии, возможно использовать классический подход, заключающийся в построении фазовой плоскости.

Такой подход информативен, прост и пригоден для совместного использования с предложенной временно-энергетической моделью.

Список литературы

1. Зернов, Н. В. Теория радиотехнических цепей / Н. В. Зернов, В. Г. Карпов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергия, 1972. – 816 с.
2. Алгазин, Е. И. Энергетический критерий устойчивости линейных систем автоматики / Е. И. Алгазин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 210 – 215. doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.210-215

Evaluation of Stability of the State of Linear Automation Systems

E. I. Algazin

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

Keywords: automation system; intrinsic time of an electric circuit; phase plane; electrical circuit.

Abstract: A method for assessing the stability of the state of linear automation systems based on the analysis of the phase plane pattern is proposed. The analytical expression of the temporal-energy model and its derivative is considered, on the basis of which the phase plane patterns are obtained for an exponential decay/diverging form of sinusoidal wave.

References

1. Zernov N.V., Karpov V.G. *Teoriya radiotekhnicheskikh tsepey* [The theory of radio circuits], Leningrad: Energiya, 1972, 816 p. (In Russ.)
2. Algazin Ye.I. [Energy criterion for the stability of linear automation systems], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 210-215, doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.210-215 (In Russ., abstract in Eng.)

Bewertung der Stabilität des Zustands linearer Automatisierungssysteme

Zusammenfassung: Es ist eine Methode zur Beurteilung der Stabilität des Zustands linearer Automatisierungssysteme auf der Grundlage der Analyse des Phasenebenenmusters vorgeschlagen. Betrachtet ist der analytische Ausdruck des zeitlichen Energiemodells und seiner Ableitung, auf deren Grundlage Bilder der Phasenebene für die dämpfende exponentielle und divergierende Sinuswelle erhalten worden sind.

Évaluation de la stabilité des systèmes d'automatisation linéaires

Résumé: Est proposé un moyen d'évaluer la stabilité de l'état des systèmes d'automatisation linéaires à la base de l'analyse de l'image du plan de phase. Est considérée l'expression analytique du modèle d'énergie temporaire et de sa dérivée à la base de laquelle sont obtenues les images du plan de phase pour les sinusoides exponentiellement décroissantes et divergentes.

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

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

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОЛИВА ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ ЧАЙНОЙ ПЛАНТАЦИИ

Дж. Ф. Мамедов, Р. О. Нариманова

*Кафедра «Автоматизация процессов», cavan62@mail.ru;
Сумгаитский государственный университет,
г. Сумгаит, Республика Азербайджан*

Ключевые слова: автоматизированная система полива; датчик; нечеткая логика; чайная плантация.

Аннотация: На основе проведенного сравнительного анализа в области автоматизированного полива чайной плантации поставлена задача по созданию интеллектуальной системы управления полива чайных кустарников. Предложена архитектура технического, информационного и программного обеспечения для автоматизации процесса полива чайной плантации. С учетом биологических свойств чайного кустарника, водного баланса земельного участка плантации и метеорологических показателей предложена схема автоматизации эффективно-го полива с применением информационно-измерительных элементов и системы управления. Для моделирования процесса управления полива предложен нечет-кий алгоритм с его реализацией на Fuzzy Logic (на базе MATLAB).

Введение

Как известно, 60 – 70 % людей в мире употребляют чай. Выращивание и уход за чайной плантацией – долгий и сложный мелиорационный и агротехни-ческий процесс, длящийся 60...70 лет и требующий эффективной агротехниче-ской работы и своевременного полива посевных площадей. Улучшение качества чайных листьев во многом зависит от субтропических метеорологических показа-телей (требуемой температуры, относительной влажности, скорости ветра, нормы дождя), геофизических данных земельных участков и биологических характери-стик выращиваемых сортов чайных кустарников [1, 2].

В настоящее время одним из направлений применения информационных технологий и компьютерной техники является сельское хозяйство, где применя-ются прогрессивные технологии и методы мелиорации и агротехнических опера-ций. Для улучшения качества чайных листьев требуется применение инновацион-ного подхода для выбора вида полива, достаточной нормы воды и обеспечения высокого урожая из чайных кустарников.

Цель статьи – разработка интеллектуальной автоматизированной системы полива для обеспечения достаточного потребления воды за счет информационно-измерительных элементов управления и регулирования.

Поставлены следующие задачи:

- создание информационного обеспечения на основе системы выбора;
- алгоритмическое обеспечение для системы автоматизированного элемен-тов для измерения метеорологических и геофизических данных;

- разработка интеллектуального устройства полива для обеспечения автоматизированного орошения чайной плантации за счет измерения метеорологических и геофизических датчиков;
- разработка полива чайной плантации.

**Информационное обеспечение
интеллектуальной автоматизированной системы полива**

Разработка автоматизированного устройства для достаточного потребления воды при поливе чайных кустарников плантации осуществляется поэтапно. На начальном этапе рассматривается вопрос создания информационного обеспечения из базы данных: биологических данных сортов чая, выращиваемых в Индии и Шри-Ланка (табл. 1); метеорологических и геофизических данных, соответствующих для выращивания сортов чая в регионах Азербайджана (табл. 2); формирования базы данных типов датчиков для измерения и регулирования при орошении чайных плантаций; создания базы знаний для поиска и управления в процессе работы устройства автоматизированного полива чайной плантации.

В базе данных сортов чая (см. табл. 1), выращиваемых в Индии и Китае [3], для субтропического региона Азербайджана осуществляется поиск и выбор наиболее подходящего сорта для его дальнейшего выращивания с наибольшей производительностью и высоким качеством.

Анализ показывает, что существующие климатические и рельефные показатели для выращивания сортов черного чая [4] в провинциях Даржилинг и Ассам соответствуют показателям на северном склоне Кавказского хребта [5], региону прикаспийской зоны Ленкорань и Закавказских регионов Азербайджана.

Метеорологические и геофизические показатели для выращивания черного чая в провинциях:

- Даржилинг – климат муссонный. Максимальная средняя температура +22 °С, минимальная – +10 °С; минимальная относительная влажность – 70 %, максимальная – 95 %; почва – краснозем. Высота над уровнем моря – 2134 м;

Таблица 1

База данных сортов чая, выращиваемых в Индии и Китае

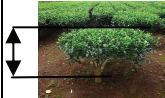
Марка чая	Высота куста	Сорт чая	Вид листа	Вкус листа
Даржилинг	0,7 м 	Черный	Крупный (Super Fine Tippy Golden Flowery Orange Pekoe) 	Мягко-сладкий
Ассам	1,5...2 м 	Черный	Крупный (Super Fine Tippy Golden Flowery Orange Pekoe) 	Терпкий
Цейлонский (Нувара Элия)		Черный, зеленый		Нетерпкий

Таблица 2

Метеорологические и геофизические данные регионов Азербайджана

Показатель	Шеки	Гусар	Губа	Закаталы
Тип почвы	краснозем	желтозем		краснозем
Механический состав почвы	суглинистый	рыхлый	глинистый	суглинистый
Уклон рельефа, °	22...35	12...18	20...32	15...20
Средняя температура воздуха, °С	+16...29	+14...29	+13...27	+14...31
Средняя относительная влажность воздуха, %	64 – 88	50 – 94	52 – 98	68 – 93
Количество дождя, мм	290...1020	310...620	300...690	320...1290

– Ассам – тропический муссонный климат. Максимальная температура весной, летом и осенью – +35...38 °С, минимальная температура зимой – +6...8 °С; минимальная относительная влажность – 35 % (летом), максимальная – 92 % (осенью и зимой); почва – желтозем. Высота над уровнем моря – 1500...2000 м;

– Нуvara Элия – экваториальный климат. Максимальная температура весной, летом и осенью – +20...25 °С, минимальная температура зимой – +1...4 °С; минимальная относительная влажность – 75 % (летом), максимальная – 85 % (осенью и зимой); почва – краснозем. Высота над уровнем моря – 1400...2400 м.

Для плодотворного выращивания высокосортного чая в Азербайджане необходимо выбрать соответствующий сорт чая по метеорологическим данным регионов Даржилинг, Ассам и Нуvara Элия. При этом сопоставим данные этих регионов с метеорологическими и геофизическими данными регионов Азербайджана (см. табл. 2).

Проведем сравнительный анализ регионов Азербайджана и регионов Индии, Китая, где выращиваются известные и качественные сорта чая, чтобы провести правильный выбор сорта чая и определить регион для выращивания этого сорта в регионе Азербайджана.

Исходя из того, что наиболее близким по метеорологическим и геофизическим данным для Азербайджана (см. табл. 2) на примере горного района Закаталы является регион Нуvara Элия, наиболее целесообразно для выращивания выбрать марку чая данного региона.

Алгоритмически процесс выбора можно представить в виде блок-схемы (рис. 1).

Как видно из блок-схемы, для выращивания чая в районе Закаталы (Азербайджан) наиболее приемлем выбор чая марки Нуvara Элия, так как метеорологические и геофизические параметры соответствуют этому региону. На основе данных параметров начинается этап выбора датчиков для измерения температуры, относительной влажности и баланса воды в красноземной почве. В соответствии с метеорологическими и геофизическими данными [6] района Закаталы (Азербайджан), представленными выше.

Датчик относительной влажности типа DT269 – трубчатый, имеет близкие к требованиям по техническим характеристикам диапазон измерения относительной влажности 0 – 100 %; точность измерения относительной влажности $< \pm 2\%$ (при 5 – 95 %); выходной сигнал относительной влажности 4...20 мА.

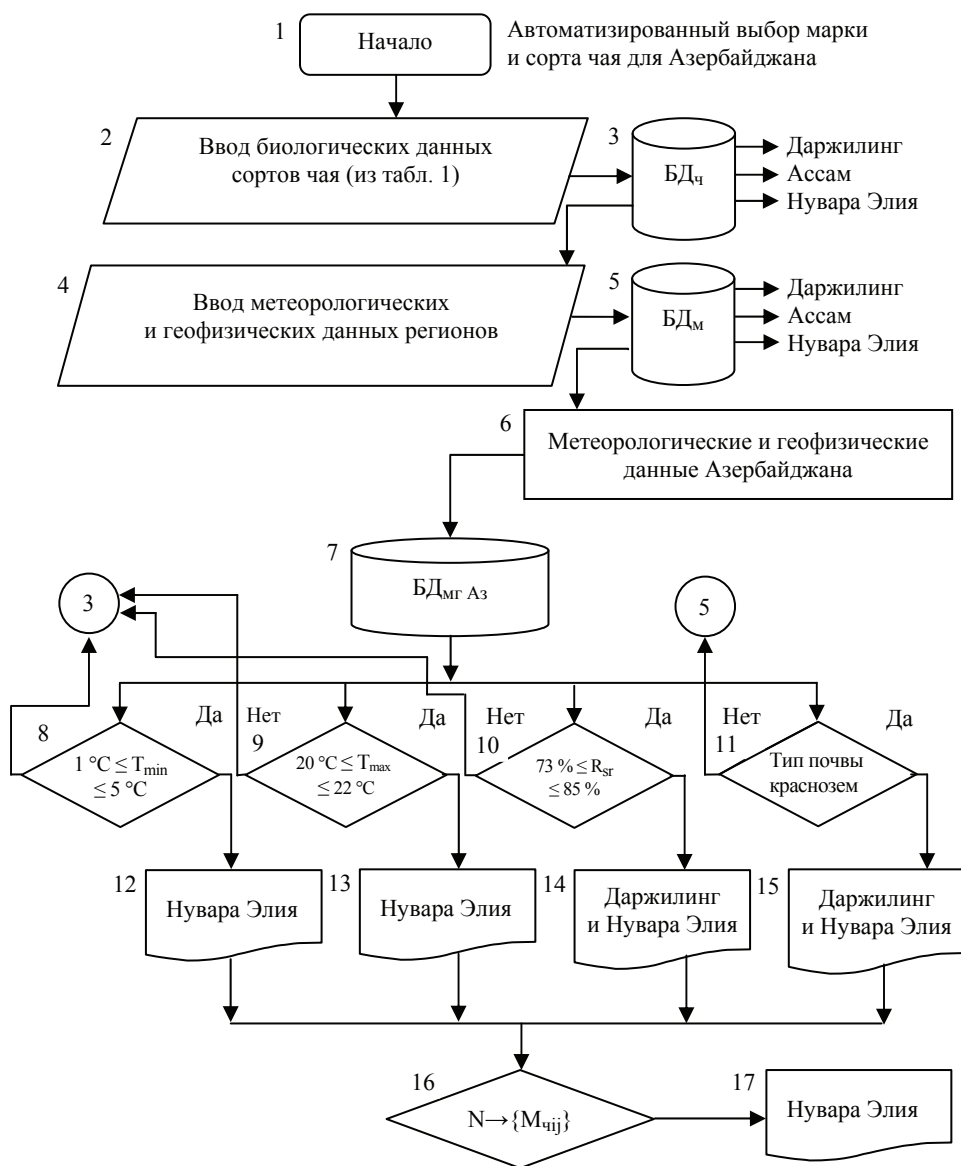


Рис. 1. Блок-схема выбора марки чая для его выращивания в районе Закаталы, Азербайджан:

N – число выбранных марок чая; $M_{чij}$ – марки чая, выбранные в результате условий блоков 8 – 11; БД_{мгАз} – база данных метеорологических и геофизических характеристик Азербайджана

Терморегулятор типа DPC FRONT COMFORT параметризован как PID-регулятор; применим как двухпозиционный регулятор; имеет измерительные входы термометра сопротивления Pt100, MB – нормальных сигналов, термоэлементов; проводит передачу сигнала квитирования фактической величины через устройство аналогового вывода 4...20 мА.

Датчик измерения водного баланса почвы WET имеет погрешность измерения $\pm 3\%$, диапазон измерения влажности почвы 0 – 100 %, выходной сигнал относительной влажности 4...20 мА.

В интеллектуальную систему полива чайной плантации, кроме выбранных информационно-измерительных датчиков и терморегулятора, подключаются исполнительный механизм (водяной насос), обратные клапаны (2 шт.), обеспечивающие закрытие и открытие водного потока для дождевого и озонового поливов, программируемый логический контроллер (ПЛК) для автоматизированного управления всей системой полива.

Автоматизированная схема и принцип работы системы водоснабжения чайной плантации

Общая схема автоматизации системы достаточного водоснабжения чайной плантации представлена на рис. 2.

Автоматизированная схема системы водоснабжения и полива чайной плантации функционирует следующим образом. При фиксировании датчиком 6 температуры воздуха в пределах $15...20\text{ }^{\circ}\text{C}$, регулирующей с помощью терморегулятора, и датчиком 5 относительной влажности в пределах $65 - 75\%$, включается центробежный водяной насос 11, который начинает всасывание воды из бака 1 и подает ее через специальные устройства полива (озоновый 13 (при достаточной влажности почвы, водой орошаются листья чайного куста) или дождевой 14 (при недостаточной влажности почвы, вода подается в корни чайного куста)). Выбор того или иного вида полива осуществляется посредством обратных клапанов 10 и 11; с помощью датчика влажности почвы 4 фиксируется требуемый показатель водного баланса в пределах $1\text{г}/80\ 000\ \text{м}^3...1\text{г}/100\ 000\ \text{м}^3$ (корни чайных кустов потребляют воду в небольшом объеме, так как потребление большого объема воды приводит к преждевременному гниению корней куста чая); после установления требуемой влажности почвы чайной плантации, подача воды отключается.

Процесс управления системой водоснабжения и полива чайной плантации осуществляется с помощью программы, записанной на ZelioSoft и сохраненной в ПЛК 9. Программируемый логический контроллер, размещенный в блоке управления 7, посредством кабелей 3 на входе принимает аналоговые сигналы с датчиков температуры, относительной влажности, водного баланса, а на выходе подключает центробежный насос, и затем включаются и отключаются обратные клапаны.

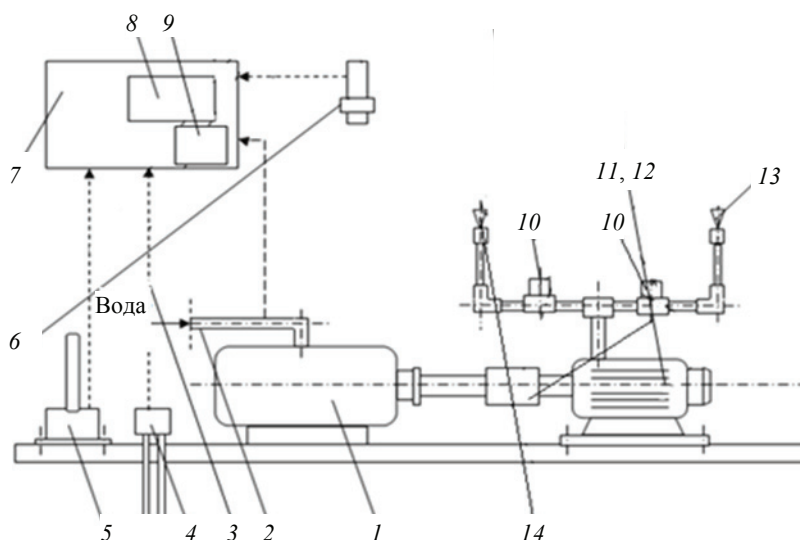


Рис. 2. Автоматизированная схема системы водоснабжения и полива чайной плантации

Алгоритмическое обеспечение управления системы водоснабжения и полива чайной плантации

Для автоматизации управления достаточного водоснабжения и полива используется нечеткий алгоритм на основе лингвистических термов [7]. С учетом того, что члены функции – a, b, c , то функция принадлежности имеет вид:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \\ 0, & c < x \end{cases} \quad (1)$$

В соответствии с (1), метеорологическими (температура – 15...20 °С и относительная влажность – 65 – 70 %) и геофизическими (водный баланс почвы – 1г/80000 м³...1г/100000 м³) данными составим нечеткий алгоритм из лингвистических термов.

Полив чайной плантации осуществляется при прохладной погоде. Температура воздуха не должно превышать 20 °С.

- $T_1 \rightarrow$ температура воздуха *очень низкая* ($a_1 = 11 \quad b_1 = 12 \quad c_1 = 13$ (°С));
- $T_2 \rightarrow$ температура воздуха *низкая* ($a_1 = 13 \quad b_1 = 14 \quad c_1 = 15$ (°С));
- $T_3 \rightarrow$ температура воздуха *средняя* ($a_1 = 15 \quad b_1 = 16 \quad c_1 = 17$ (°С)).

- $R_1 \rightarrow$ относительная влажность воздуха *низкая* ($a_2 = 55 \quad b_2 = 57 \quad c_2 = 60$ (%));
- $R_2 \rightarrow$ относительная влажность воздуха *средняя* ($a_2 = 60 \quad b_2 = 62 \quad c_2 = 65$ (%));
- $R_3 \rightarrow$ относительная влажность воздуха *в норме* ($a_2 = 65 \quad b_2 = 67 \quad c_2 = 70$ (%));

- $V_1 \rightarrow$ водный баланс почвы *низкая* ($a_3 = 0,113 \quad b_3 = 0,115 \quad c_3 = 0,117$ (1м²/м³));
- $V_2 \rightarrow$ водный баланс почвы *средняя* ($a_3 = 0,117 \quad b_3 = 0,119 \quad c_3 = 0,121$ (1м²/м³));
- $V_3 \rightarrow$ водный баланс почвы *в норме* ($a_3 = 0,121 \quad b_3 = 0,123 \quad c_3 = 0,124$ (1м²/м³));

Для установления режима работы водяного центробежного насоса с помощью лингвистических термов запишем нижеследующее выражение:

- $S_1 \rightarrow$ водяной центробежный насос *не работает* (3 1 0 (мин));
- $S_2 \rightarrow$ водяной центробежный насос работает в режиме озонового полива листьев чайной плантации *короткое время* (0 3 5 (мин));
- $S_3 \rightarrow$ водяной центробежный насос работает в режиме дождевого полива *длительное время* (5 7 9 (мин)).

В соответствии с созданными лингвистическими термами строится алгоритм управления для достаточного потребления воды чайной плантации:

ЕСЛИ «температура воздуха *очень низкая*»;

И «относительная влажность воздуха *средняя*»;

И «водный баланс почвы *в норме*»;

ТО «водяной центробежный насос работает в режиме озонового полива листьев чайной плантации *короткое время* (0 3 5 (мин))».

ЕСЛИ «температура воздуха *низкая*»;

И «относительная влажность воздуха *средняя*»;

И «водный баланс почвы *низкий*»;

ТО «водяной центробежный насос работает в режиме дождевого полива *длительное время* (5 7 9 (мин))».

ЕСЛИ «температура воздуха *средняя*»;
И «относительная влажность воздуха в *средняя*»;
И «водный баланс почвы *средний*»;
ТО «водяной центробежный насос работает в режиме озонового полива листьев чайной плантации *короткое время* (0 3 5 (мин))».

ЕСЛИ «температура воздуха *средняя*»;
И «относительная влажность воздуха в *норме*»;
И «водный баланс почвы в *норме*»;
ТО «водяной центробежный насос *не работает*».

ЕСЛИ «температура воздуха в *норме*»;
И «относительная влажность воздуха *средняя*»;
И «водный баланс почвы в *норме*»;
ТО «водяной центробежный насос работает в режиме озонового полива листьев чайной плантации *короткое время*».

Предлагаемый алгоритм управления позволяет в достаточной мере экономить расход воды при поливе чайной плантации.

Заключение

1. На основе анализа видов чайных сортов, их биологических характеристик, метеорологических и геофизических данных регионов, где выращиваются данные сорта чая, создано информационное обеспечение интеллектуальной автоматизированной системы полива.

2. Разработана блок-схема выбора марки чая для его выращивания в регионе Азербайджан, и осуществлен процесс выбора информационно-измерительных элементов автоматизированной системы полива.

3. Предложены автоматизированная схема и принцип работы системы водоснабжения чайной плантации.

4. Предложен нечеткий алгоритм, обеспечивающий эффективное управление системы водоснабжения и полива чайной плантации.

Список литературы

1. Обоснование необходимости орошения чайных плантаций в Адыгее на основе оценки почвенных и климатических условий / С. В. Добежина, Т. Д. Беседина, М. Т. Туов, Э. К. Пчихачев // Вестник АПК Ставрополя. – 2015. – № 4 (20). – С. 155 – 160.

2. Параскевов, А. В. Предпосылки и особенности разработки автоматизированной системы «Микроклимат» / А. В. Параскевов, С. С. Лебедев // Политемат. сетевой электрон. науч. журнал Кубанского гос. аграрного ун-та. – 2015. – № 112. – С. 1881 – 1892.

3. Prakashgoud, P. Intelligent Irrigation Control System by Employing Wireless Sensor Networks / P. Prakashgoud, B. L. Desai // International Journal of Computer Applications. – 2013. – Vol. 79, No. 11. – P. 33 – 40.

4. Development of Complex Intellectual System for Efficiency Growing Tee Plant / E. B. Ghuseynov, J. F. Mammadov, A. A. Iskenderov, G. Y. Abbasova // Theoretical Applied and Science. – 2015. – No. 8 (28). – P. 37 – 43. doi: 10.15863/TAS.2015.08.28.5

5. Впльчинский, Н. Б. Итоги испытания чайного куста на северном склоне Кавказского хребта: – Тр. Сочинской оп. ст. – Туапсе / Н. Б. Впльчинский // Ударник. – 2001. – № 16. – С. 3 – 57.

6. Алиев, З. Г. Обоснование применения прогрессивной техники и технологии полива в сельском хозяйстве Азербайджана / З. Г. Алиев // Вестн. Алтайского гос. аграрного ун-та. – 2013. – № 7 (105). – С. 44 – 49.

7. Деменков, Н. П. Нечеткое управление в технических системах : учеб. пособие / Н. П. Деменков. – М. : МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2005. – 200 с.

Development of Intellectual Irrigation System for Growing Tea Plantation

J. F. Mammadov, R. O. Narimanova

*Department of Process Automation, cavan62@mail.ru;
Sumgait State University, Sumgait, Republic of Azerbaijan*

Keywords: automated irrigation system; sensor; fuzzy logic; tea plantation.

Abstract: Based on the conducted comparative analysis in the field of automated watering of tea plantations the task of creating an intelligent control system for watering tea bushes has been set. The architecture of technical, information and software for automating the process of watering a tea plantation is proposed. Given the biological properties of the tea shrub, the water balance of the plantation land and meteorological indicators, a scheme for automating efficient irrigation using information-measuring elements and a control system is proposed. To model the irrigation control process, a fuzzy algorithm is proposed with its implementation on Fuzzy Logic (based on MATLAB).

References

1. Dobezhina C.V., Besedina T.D., Tuov M.T., Pchikhachev E.K. [Justification of the need to irrigate tea plantations in Adygea based on the assessment of soil and climatic conditions], *Vestnik APK Stavropol'ya* [Vestnik APK Stavropol], 2015, no. 4 (20), pp. 155-160. (In Russ.)
2. Paraskevov A.V., Lebedev S.S. [Background and features of the development of the automated system "Microclimate"], *Politematicheskiiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Political Mathematical Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University], 2015, no. 112, pp. 1881-1892. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Prakashgoud P., Desai B.L. Intelligent Irrigation Control System by Employing Wireless Sensor Networks, *International Journal of Computer Applications*, 2013, vol. 79, no. 11, pp. 33-40.
4. Ghuseynov E.B., Mammadov J.F., Iskenderov A.A., Abbasova G.Y. Development of Complex Intellectual System for Efficiency Growing Tee Plant, *Theoretical Applied and Science*, 2015, no. 8 (28), pp. 37-43, doi: 10.15863/TAS.2015.08.28.5
5. Vpl'chinskiy N.B. [Results of the test of tea bush on the northern slope of the Caucasus Range: - Tr. Sochi Op. Art. - Tuapse], *Udarnik* [Drummer], 2001, no. 16, pp. 3-57. (In Russ.)
6. Aliyev Z.G. [The rationale for the use of advanced technology and irrigation technology in agriculture in Azerbaijan], *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Altai State Agrarian University], 2013, no. 7 (105), pp. 44-49. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Demenkov N.P. *Nechetkoye upravleniye v tekhnicheskikh sistemakh: uchebnoye posobiye* [Fuzzy control in technical systems: a tutorial], Moscow: MGTU imeni N. E. Bauman, 2005, 200 p. (In Russ.)

Entwicklung eines intelligenten Bewässerungssystems für den Anbau von Teeplantagen

Zusammenfassung: Auf der Grundlage der durchgeführten vergleichenden Analyse im Bereich der automatisierten Bewässerung von Teeplantagen ist die Aufgabe gestellt, ein intelligentes Steuerungssystem für die Bewässerung von Teebüschen zu schaffen. Es ist die Architektur von Technik-, Informations- und Softwareversicherung zur Automatisierung des Bewässerungsprozesses einer Teeplantage vorgestellt. Unter Berücksichtigung der biologischen Eigenschaften des Teestrauchs, des Wasserhaushalts des Plantagenlandes und meteorologischer Indikatoren ist ein Schema zur Automatisierung der effektiven Bewässerung unter Verwendung von Informationsmeselementen und einem Steuerungssystem vorgeschlagen. Zur Modellierung des Bewässerungssteuerungsprozesses ist ein ungerader Algorithmus mit seiner Implementierung auf Fuzzy Logic (basierend auf MATLAB) vorgeschlagen.

Élaboration d'un système d'arrosage intelligent pour la culture d'une plantation de thé

Résumé: A la base d'une analyse comparative réalisée dans le domaine de l'arrosage automatisé de la plantation de thé est posé un problème de créer un système intelligent de la commande de l'arrosage des arbustes à thé. Est proposée une architecture du logiciel pour automatiser le processus d'arrosage de la plantation de thé. Compte tenu des propriétés biologiques de l'arbuste à thé, de l'équilibre hydrique de la parcelle de plantation et des indicateurs météorologiques est proposé un schéma d'automatisation de l'arrosage efficace avec l'utilisation des éléments d'information et de mesure ainsi que d'un système de contrôle. Pour simuler le processus du contrôle de l'arrosage, est proposé un algorithme flou avec sa mise en œuvre sur Fuzzy Logic (à la base de MATLAB).

Авторы: *Мамедов Джаванир Фирудин оглу* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация процессов»; *Нариманова Роя Октай гызы* – докторант кафедры «Автоматизация процессов», Сумгаитский государственный университет, г. Сумгаит, Республика Азербайджан.

Рецензент: *Дмитриевский Борис Сергеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

УДК 532.133, 622.69, 534-8
DOI: 10.17277/vestnik.2020.02.pp.243-253

ВЛИЯНИЕ ГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ НЕФТИ

М. А. Промтов¹, Н. Ц. Гатапова¹, В. Я. Борщев¹,
А. Н. Колиух¹, А. Ю. Степанов¹, О. А. Шенна²

Кафедры: «Технологические процессы, аппараты и техносферная
безопасность» (1), promptov.ma@mail.tstu.ru;
«Общетеоретические дисциплины» (2),
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия

Ключевые слова: вязкость; гидродинамический кавитатор; кавитация; кривая течения; нефть; реологические свойства.

Аннотация: Исследована возможность изменения реологических свойств вязкой нефти путем гидроимпульсной кавитационной обработки. Предложен механизм, объясняющий изменение структуры сложных структурных единиц нефти в результате воздействия кавитации. Проведены экспериментальные исследования по обработке вязкой нефти в гидродинамическом кавитаторе с соплами Стентона. Анализ реологических характеристик показал, что снижение вязкости обработанной нефти достигает 50 %.

Обозначения

E – удельная энергия на обработку образца нефти, Дж/кг;	t – время обработки, с;
m – масса образца нефти, кг;	V – скорость жидкости в зоне с наименьшим давлением в горловине сопла Стентона, м/с;
N – расчетная потребляемая мощность, затраченная насосом на прокачку нефти через гидродинамический кавитатор, Вт;	v – объем образца нефти, м ³ ;
$N_{уд}$ – удельная мощность на обработку объема образца нефти, Вт/м ³ ;	ε – удельная энергия на обработку объема образца нефти, Дж/м ³ ;
P – давление насыщенных паров легких компонентов нефти при температуре обработки, Па;	μ – вязкость, Па·с;
P_V – наименьшее давление в горловине сопла Стентона, Па;	ρ – плотность, кг/м ³ ;
	σ – скорость сдвига, с ⁻¹ ;
	τ – напряжение сдвига, Па

Введение

Технология трубопроводного транспорта нефти существенно зависит от ее реологических свойств. Для улучшения реологических свойств вязкой нефти применяются следующие методы: разбавление вязкой нефти маловязкой нефтью, газовым конденсатом и т.п.; газонасыщение нефти; перекачка в виде водной эмульсии; перекачка с присадками и поверхностно-активными веществами; а также методы, основанные на внесении в поток дополнительной тепловой энер-

гии («горячие» трубопроводы с системами попутного подогрева) [1, 2]. Кроме того, могут быть применены методы физического воздействия, например, СВЧ, магнитное, ультразвуковое, электроимпульсное, гидроимпульсное, кавитационное воздействия [1 – 4]. Перспективным направлением является гидроимпульсная кавитационная обработка (ГКО), при которой происходит генерирование в жидкости микро- и макроимпульсов давления [3]. Гидроимпульсная кавитационная обработка осуществляется за счет генерирования в обрабатываемой жидкости пульсаций давления и скорости потока. При движении потока жидкости через канал с периодически изменяющейся площадью проходного сечения, потери энергии на создание импульсов давления в жидкости минимальны, так как в этом случае жидкость является как рабочим телом для создания пульсаций давления, так и объектом обработки. Данный метод реализуется в гидродинамических кавитаторах (ГК), в которые генерируются импульсы давления в потоке обрабатываемой жидкости [5 – 8].

Гидроимпульсная кавитационная обработка нефти и нефтепродуктов позволяет снизить их вязкость и температуру застывания, изменить внутреннюю структуру дисперсной нефтяной системы. В процессе ГКО нефти энергия, выделяющаяся при схлопывании кавитационных пузырьков, может привести к разрыву межмолекулярных связей, а при определенных условиях к разрыву и слабым внутримолекулярным связям [3, 9 – 14].

Теоретическая часть

Состояние нефтяной дисперсной системы зависит от таких объемных характеристик, как энергия и сила межмолекулярных взаимодействий. Во внутренней структуре нефтяных систем возможно сосуществование различных типов взаимодействий, которые определяются расстоянием между молекулами.

При близких расстояниях (порядка $\leq 0,2 \dots 0,3$ нм) между молекулами возникают химические связи с энергией более 100 кДж/моль; на средних ($0,3 \dots 0,7$ нм) – физико-химические взаимодействия характеризуются энергией 40...100 кДж/моль [15]; дальних ($0,7 \dots 2,0$ нм) и сверхдальних ($> 2,0$ нм) – существуют слабые межмолекулярные взаимодействия, энергия связи которых изменяется пропорционально 6-7 степени расстояния между взаимодействующими молекулами. Межмолекулярные комплексы образуются в нефти и за счет водородных связей. К образованию средних водородных связей склонны гетероатомы, ареновые фрагменты молекул смолисто-асфальтеновых веществ нефти. Слабые водородные связи (8...20 кДж/моль) характерны практически для всех углеводородов нефти [16]. Водородные связи с энергией до 40 кДж/моль разрушаются при тепловом воздействии.

При гидроимпульсной кавитационной обработке нефти возможны изменения межмолекулярных расстояний, что может привести как к разрушению структуры дисперсной системы (в случае увеличения расстояний между ее компонентами), так и химическим реакциям (в случае уменьшения расстояний между молекулами до $\leq 0,2 \dots 0,3$ нм). Гидроимпульсная кавитационная обработка нефти различной химической природы приводит к изменению ее углеводородного состава: увеличивается доля низкомолекулярных *n*-алканов, ароматических и нафтеновых углеводородов, что связано с перестройкой сложных структурных единиц (ССЕ) и диффузией этих компонентов из состава дисперсной фазы в дисперсионную среду [2].

В высокопарафинистой нефти ядро ССЕ формируют парафины, кристаллы которых разрушаются при ГКО с увеличением удельной поверхности и, следовательно, повышением поверхностной энергии. Коллоидная углеводородная система после ГКО стремится к понижению избыточной энергии за счет снижения удельной поверхности. Для высокопарафинистой нефти, в которой содержание смол и ас-

фальтенов низкое, снижение поверхностной энергии происходит в процессе перекристаллизации *n*-алканов с образованием сплошной структурной сетки, что приводит к увеличению структурно-механических параметров дисперсной системы [2]. Снижение вязкости и напряжений сдвига нефти при ГКО в гидродинамическом реакторе с профилем сопла Вентури подтверждается авторами работ [17, 18].

Гидроимпульсная кавитационная обработка нефти может вызвать разрыв молекулярной цепочки соединений по атомной связи С–С как более слабой по сравнению со связью С–Н [10]. Согласно [12 – 14], алкильные цепи и боковые цепи ароматических кольцевых структур в нефти разрываются за счет энергии, выделившейся при ГКО. Разрыв связей С–С и С–Н в молекулах *n*-алканов приводит к образованию свободных радикалов, реакции которых определяют состав и свойства конечных продуктов. Предполагается [14], что основные направления превращений короткоцепных *n*-алканов при кавитации связаны с реакциями диспропорционирования (реакции самоокисления – самовосстановления) [14] и изомеризации *n*-алканы $\leftrightarrow$ изоалканы. Равновесие реакции в зависимости от условий ГКО сдвигается как в сторону образования продуктов реакции (в подавляющем большинстве), так и в противоположном направлении (после второго цикла кавитации для *n*-C₁₄H₃₀ и после третьего – для *n*-C₁₅H₃₂). Возможны промежуточные реакции, в которых *n*-алканы C₁₈₊ превращаются в низкомолекулярные соединения [13, 14]. Таковыми могут быть, например, реакции, протекающие по механизму «конденсация – деление». Можно сделать вывод, что ГКО нефти способствует разрушению надмолекулярных структур, разрыву межмолекулярных связей различной природы, приводит к деформации, изменению структуры и разрушению ССЕ.

Для определения гидродинамических параметров ГК проводили моделирование течения потока нефти через трубку с профилем сопла Стентона в программном комплексе ANSYS CFX. По численным данным скорости и давления определялись числа гидродинамической кавитации в области наибольшей скорости и наименьшего давления потока

$$C = (P - P_V) / (0,5\rho \cdot V^2). \quad (1)$$

Кавитация начинается при $C \approx 1$; если $C < 1$, то кавитация считается развитой. В качестве давления насыщенного пара легких компонентов нефти принимали давление насыщенного пара бензиновой фракции при температуре 25 °С, $P = 7$ кПа [19].

На рисунке 1 показана картина поля скоростей в последней ступени ГК с профилем сопла Стентона.

По результатам моделирования течения потока нефти в сопле Стентона, наименьшее давление в горловине составляет 30 кПа, наибольшая скорость потока 14,1 м/с. В соответствии с полученными параметрами наименьшее число гидродинамической кавитации $C = 0,26$, что указывает на развитую кавитацию в потоке нефти в диффузоре сопла Стентона.

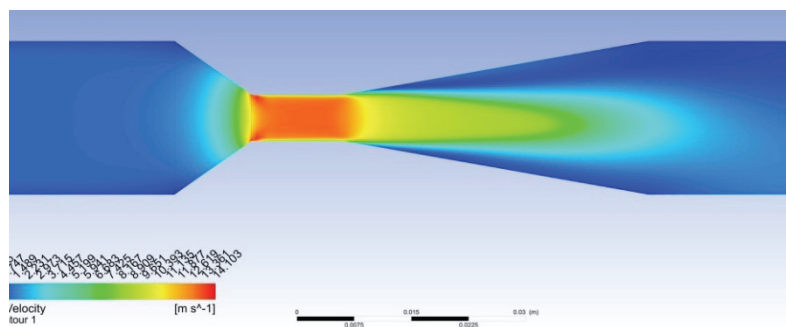


Рис. 1. Поле скоростей потока нефти в трубке с профилем сопла Стентона

Экспериментальная часть

Гидродинамические кавитаторы являются эффективным оборудованием для многофакторного импульсного воздействия на жидкость в целях изменения физико-химических параметров жидкости, получения стабильных, высокодисперсных эмульсий и суспензий, интенсификации процессов растворения и экстрагирования веществ [5 – 8]. Обработка жидкости в ГК осуществляется за счет импульсного многофакторного воздействия: вихреобразования, макро- и микромасштабных пульсаций давления, интенсивной кавитации. Макромасштабные импульсы давления – это импульсы, генерируемые в потоке жидкости при периодическом изменении проходного сечения ГК. Микромасштабные импульсы возникают при образовании и пульсациях вихревых структур и кавитационных образований в потоке жидкости. Условное разделение на микро- и макромасштабность импульсов давления характеризует величину объема жидкости, который подвергается воздействию импульсов давления.

Экспериментальные исследования проводились на установке, включающей ГК с четырьмя элементами для генерирования кавитации, имеющими профиль сопла Стентона.

Установка состоит из поршневого насоса, гидродинамического кавитатора, емкостей, приборов для измерения расхода, давления и температуры. Частота вращения вала насоса и, соответственно, его подача регулировались частотным преобразователем. Обработка нефти осуществлялась перекачиванием нефти под давлением через ГК из одной емкости в другую.

Для ГКО использовали нефть со следующими параметрами: плотность – $874,2 \text{ кг/м}^3$; содержание, %, асфальтенов – 2,43; смол – 9,98; парафинов – 6,99; механических примесей – 0,08; воды – 0,09; серы – 0,93; температура застывания 19°C .

Изменение реологических параметров исходной нефти и образца после обработки в ГК определяли по кривым течения (рис. 2, 3), полученным на программируемом ротационном вискозиметре DV2T RV Брукфильд при температурах 5 и 20°C . Для поддержания постоянной температуры использовался жидкостной криотермостат.

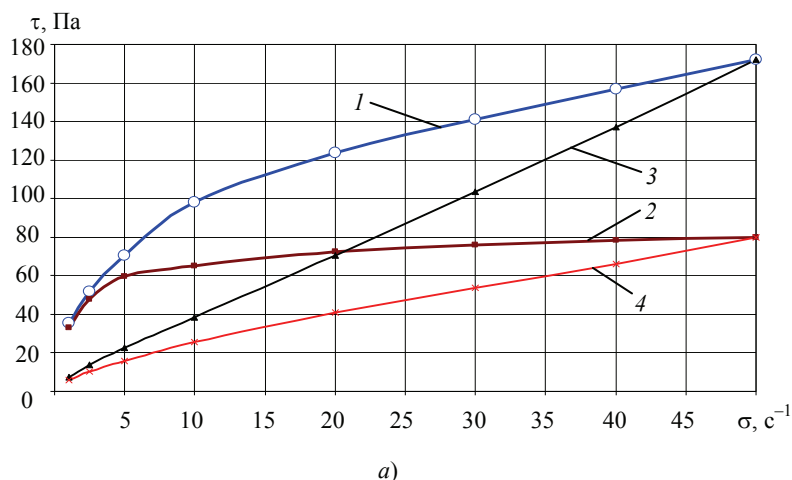


Рис. 2. Кривые течения нефти при 5°C (а) (начало):

1, 3 – прямой и обратный ход для исходной нефти;
2, 4 – прямой и обратный ход для обработанного образца

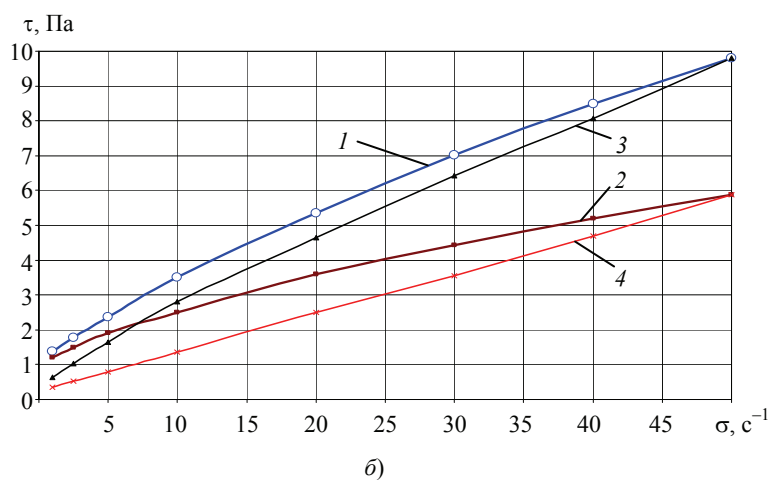


Рис. 2. Кривые течения нефти при 20 °С (б) (окончание)

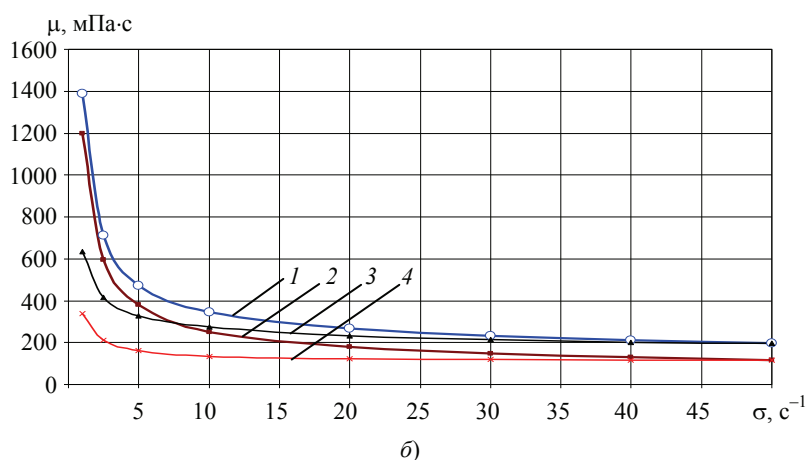
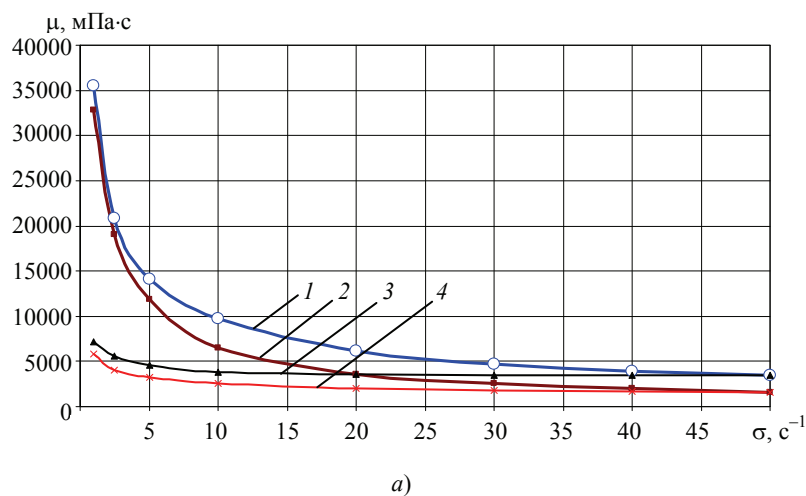


Рис. 3. Зависимости вязкости нефти от скорости сдвига при 5 °С (а) и 20 °С (б):

1, 3 – прямой и обратный ход для исходной нефти;
2, 4 – прямой и обратный ход для обработанного образца

Обсуждение результатов и выводы

При снятии кривых течения необработанного и обработанного образцов нефти были получены характерные петли гистерезиса при 5 и 20 °С (см. рис. 2). Линии прямого хода не повторяют линии обратного хода, что свидетельствует о тиксотропной структуре как обработанного, так и необработанного образцов нефти.

Кривые течения нефти (см. рис. 2, а) соответствуют модели Балкли-Гершеля (нелинейно-вязкопластичная жидкость с предельным напряжением сдвига) [20] и представлены следующими уравнениями:

$$\tau = 23,8 + 20,75 \cdot \sigma^{0,508} \text{ (кривая 1);} \quad (2)$$

$$\tau = 22,2 + 20,12 \cdot \sigma^{0,285} \text{ (кривая 2);} \quad (3)$$

$$\tau = 3,25 + 3,86 \cdot \sigma^{0,965} \text{ (кривая 3);} \quad (4)$$

$$\tau = 2,19 + 4,01 \cdot \sigma^{0,754} \text{ (кривая 4).} \quad (5)$$

Кривые течения нефти (см. рис. 2, б) также соответствуют модели Балкли-Гершеля:

$$\tau = 0,87 + 0,46 \cdot \sigma^{0,76} \text{ (кривая 1);} \quad (6)$$

$$\tau = 0,815 + 0,37 \cdot \sigma^{0,671} \text{ (кривая 2);} \quad (7)$$

$$\tau = 0,295 + 0,35 \cdot \sigma^{0,843} \text{ (кривая 3);} \quad (8)$$

$$\tau = 0,254 + 0,105 \cdot \sigma^{1,016} \text{ (кривая 4).} \quad (9)$$

Экспериментальные данные, полученные при обработке нефти в установке на базе ГК, позволяют определить удельные энергетические характеристики процесса. Удельная энергия, диссипируемая в массе образца нефти за единицу времени, определяется потребляемой мощностью N , затрачиваемой внешним насосом на подачу нефти в ГК за время обработки образца:

$$E = Nt/m; \quad (10)$$

$$N = \Delta PQ; \quad (11)$$

$$m = \nu \rho; \quad (12)$$

$$\varepsilon = Nt/\nu; \quad (13)$$

$$N_{уд} = N/\nu. \quad (14)$$

Расчетные значения потребляемой мощности, удельная энергия и удельная потребляемая мощность, затраченные на обработку образцов нефти, приведены в табл. 1.

На рисунке 4 показаны графики относительного уменьшения вязкости обработанного в ГК образца нефти по сравнению с необработанным, %, в зависимости от скорости сдвига при 5 и 20 °С, из которых видно, что с увеличением скорости сдвига происходит рост относительного уменьшения вязкости по экспоненциальной зависимости. Экстраполируя графики по скорости сдвига, можно предположить, что при скорости сдвига выше 60 с⁻¹ при 20 °С снижение вязкости нефти после обработки в ГК будет примерно 40 %, аналогично при скорости сдвига выше 100 с⁻¹ при 5 °С снижение вязкости нефти после обработки будет примерно 60 %. Таким образом, снижение вязкости нефти в результате гидродинамической кавитационной обработки можно получить около 50 %.

Таблица 1

Параметры обработки нефти в ГК

Параметр	Величина
Давление на входе в ГК, МПа	2,3
Расход, л/с	0,36
Объем образца нефти, м ³	0,009
Температура образца начальная, °С	24,8
Температура образца конечная, °С	25,7
Время обработки, с	25
Расчетная потребляемая мощность, Вт	828
Удельная мощность на обработку:	
массы образца, Вт/кг	106
объема образца, Вт/м ³	92·10 ³
Удельная энергия на обработку:	
массы образца, Дж/кг	2650
объема образца, Дж/м ³	2,3·10 ⁶
Удельная потребляемая мощность, кВт·ч/т	0,737

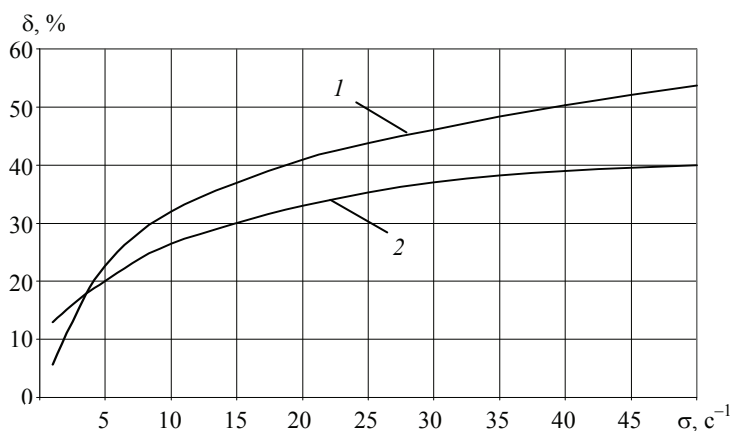


Рис. 4. Степень уменьшения вязкости нефти в зависимости от скорости сдвига:
1, 2 – прямой ход при 5 и 20 °С соответственно

Исходя из теоретических предположений и анализа экспериментальных данных, можно сделать вывод, что реологические свойства и физико-химические характеристики нефти могут быть улучшены за счет ГКО, которая способствует разрушению надмолекулярных структур, разрыву межмолекулярной связи различной природы, приводит к деформации, изменению структуры и разрушению ССЕ. В нефтяной дисперсионной системе могут разрываться слабые внутримолекулярные связи больших молекул. При разрыве связей между молекулами нефтяной дисперсной системы могут образовываться новые структуры с новыми физико-химическими свойствами.

Вероятнее всего, при ГКО нефти происходит диспергирование твердых кристаллов парафинов, а также разрушение надмолекулярных связей между ССЕ и разрушение их самих. Предполагается, что смолы образуют смешанные кристаллы с парафинами и изменяют их структуру. Смолы распределяются между двумя фазами, разрыхляют кристаллическую структуру и изменяют строение

ассоциатов кристаллов парафина. Адсорбция смол на разрушенных кристаллах парафина предотвращает их агрегацию. В высокопарафинистых нефтях ядро ССЕ формируют парафины, кристаллы которых разрушаются при ГКО с увеличением удельной поверхности и, следовательно, повышением поверхностной энергии. Коллоидная углеводородная система после ГКО стремится к понижению избыточной энергии за счет снижения удельной поверхности.

Список литературы

1. Обзор современных методов воздействия на реологические свойства тяжелых высоковязких нефтей / И. И. Хасанов, Р. А. Шакиров, А. Ю. Леонтьев [и др.] // Нефтегазохимия. – 2018. – № 3. – С. 49 – 54. doi: 10.24411/2310-8266-2018-10305
2. Волкова, Г. И. Влияние ультразвука на состав и свойства парафинистой высокосмолистой нефти / Г. И. Волкова, Р. В. Ануфриев, Н. В. Юдина // Нефтехимия. – 2016. – Т. 56, № 5. – С. 454 – 460. doi: 10.7868/S0028242116050208
3. Промтов, М. А. Технологии импульсного энергетического воздействия на нефть и нефтепродукты / М. А. Промтов // Экологический вестник России. – 2011. – № 3. – С. 14 – 16.
4. Подготовка и транспорт проблемных нефтей (научно-практические аспекты) / Г. И. Волкова, Ю. В. Лоскутова, И. В. Прозорова, Е. М. Березина. – Томск : Издат. дом ТГУ, 2015. – 136 с.
5. Abiev, R. Sh. Hydrodynamics of Pulsating Flow Type Apparatus: Simulation and Experiments / R. Sh. Abiev, A. S. Galushko // Chemical Engineering Journal. – 2013. – No. 229. – P. 285 – 295.
6. Vichare, N. P. Optimization of Hydrodynamic Cavitation Using a Model Reaction / N. P. Vichare, P. R. Gogate, A. B. Pandit // Chemical Engineering & Technology. – 2000. – Vol. 23, No. 8. – P. 683 – 690.
7. Гидродинамическая кавитационная обработка как способ снижения вязкости высоковязких нефтей и повышения эффективности транспортировки / А. Э. Бранд, А. Г. Закирзаков, С. Ю. Торопов, С. М. Соколов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-3. – 6 с.
8. Промтов, М. А. Характеристики потока жидкости в каналах проточных гидродинамических статических кавитаторов / М. А. Промтов, А. Ю. Степанов, А. В. Алешин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 3. – С. 562 – 569.
9. Сурков, В. Г. Влияние условий механического воздействия на изменение состава парафинов нефти / В. Г. Сурков, А. К. Головкин, М. В. Можайская // Известия Томского политехн. ун-та. – 2012. – Т. 321, № 3. – С. 148 – 152.
10. Промтов, М. А. Изменение фракционного состава нефти при гидроимпульсной кавитационной обработке / М. А. Промтов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 412 – 419. doi: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.412-419
11. Промтов, М. А. Гидроимпульсная кавитационная обработка нефти в роторном импульсном аппарате / М. А. Промтов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 3. – С. 455 – 460. doi: 10.17277/vestnik.2018.03.pp.455-460
12. Превращение алканов под действием единичного импульса гидродинамической кавитации. II. Поведение среднецепных алканов C_{21} – C_{38} / В. Н. Торховский, С. И. Воробьев, Е. В. Егорова [и др.] // Вестник МИТХТ им. М. В. Ломоносова. – 2014. – Т. 9, № 4. – С. 59 – 69.
13. Использование многоциклового кавитации для интенсификации переработки нефтяного сырья / В. Н. Торховский, С. И. Воробьев, С. Н. Антонюк [и др.] // Технологии нефти и газа. – 2015. – № 2 (97). – С. 9 – 17.
14. Превращение короткоцепных n -алканов под действием гидродинамической кавитации / В. Н. Торховский, С. Н. Антонюк, С. И. Воробьев, М. В. Николаева // Тонкие химические технологии. – 2017. – Т. 12, № 5. – С. 65 – 70.

15. Туманян, Б. П. Научные и прикладные аспекты теории нефтяных дисперсных систем / Б. П. Туманян. – М. : ООО «ТУМА ГРУПП» ; Изд-во «Техника», 2000. – 336 с.
16. Сюняев, З. И. Нефтяные дисперсные системы / З. И. Сюняев, Р. З. Сафиева, Р. З. Сюняев. – М. : Химия, 1990. – 226 с.
17. Якименко, К. Ю. Применение технологии гидродинамической кавитационной обработки высоковязких нефтей с целью повышения эффективности транспортировки / К. Ю. Якименко, А. А. Венгеров, А. Э. Бранд // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 5-3. – С. 531 – 536.
18. Изучение воздействия кавитации на реологические свойства тяжелой нефти / М. С. Муллакаев, В. О. Абрамов, В. М. Баязитов [и др.] // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2011. – № 5. – С. 24 – 27.
19. Хафизов, Ф. Ш. Давление насыщенных паров для нефтепродуктов / Ф. Ш. Хафизов, А. В. Краснов // Электрон. науч. журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. – № 3. – С. 406 – 413.
20. Шрамм, Г. Основы практической реологии и реометрии : монография / Г. Шрамм ; пер. с англ. И. А. Лавыгина ; под. ред. В. Г. Куличихина. – М. : КолосС, 2003. – 312 с.

The Influence of Hydropulse Processing on Rheological Oil Parameters

M. A. Promtov¹, N. Z. Gatapova¹, V. Ya. Borschev¹,
A. N. Koliukh¹, A. Yu. Stepanov¹, O. A. Sheina²

*Departments of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety (1),
promtov.ma@mail.tstu.ru;
General Theoretical Disciplines (2), TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: viscosity; hydrodynamic cavitator; cavitation; curve current; oil; rheological properties.

Abstract: The possibility of changing the rheological properties of viscous oil by hydro-pulse cavitation treatment is investigated. A mechanism is proposed that explains the change in the structure of complex structural units of oil as a result of cavitation. Experimental studies on the processing of viscous oil in a hydrodynamic cavitator with Stanton nozzles have been carried out. An analysis of the rheological characteristics showed that a decrease in the viscosity of the processed oil reaches 50%.

References

1. Khasanov I.I., Shakirov R.A., Leont'yev A.Yu., Poletayeva O.Yu., Babayev E.R., Mamedova P.Sh. [Overview of modern methods of influencing the rheological properties of heavy high-viscosity oils], *Neftegazokhimiya* [Oil and gas chemistry], 2018, no. 3, pp. 49-54, doi: 10.24411/2310-8266-2018-10305 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Volkova G.I., Anufriyev R.V., Yudina N.V. [Influence of ultrasound on the composition and properties of paraffinic high-tar oil], *Neftekhimiya* [Petrochemistry], 2016, vol. 56, no. 5, pp. 454-460, doi: 10.7868/S0028242116050208 (In Russ.)
3. Promtov M.A. [Technology of pulsed energy exposure for oil and oil products], *Ekologicheskiiy vestnik Rossii* [Ecological Bulletin of Russia], 2011, no. 3, pp. 14-16. (In Russ.)
4. Volkova G.I., Loskutova Yu.V., Prozorova I.V., Berezina Ye.M. *Podgotovka i transport problemnykh neftey (nauchno-prakticheskiye aspekty)* [Preparation and

transportation of problematic oils (scientific and practical aspects)], Tomsk: Izdatel'skiy dom TGU, 2015, 136 p. (In Russ.)

5. Abiev R.Sh., Galushko A.S. Hydrodynamics of Pulsating Flow Type Apparatus: Simulation and Experiments, *Chemical Engineering Journal*, 2013, no. 229, pp. 285-295.

6. Vichare N.P., Gogate P.R., Pandit A.B. Optimization of Hydrodynamic Cavitation Using a Model Reaction, *Chemical Engineering & Technology*, 2000, vol. 23, no. 8, pp. 683-690.

7. Brand A.E., Zakirzakov A.G., Toropov S.Yu., Sokolov S.M. [Hydrodynamic cavitation treatment as a way to reduce the viscosity of highly viscous oils and increase the efficiency of transportation], *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2015, no. 2-3, 6 p. (In Russ., abstract in Eng.)

8. Promptov M.A., Stepanov A.Yu., Aleshin A.V. [Characteristics of the fluid flow in the channels of flowing hydrodynamic static cavitators], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 3, pp. 562-569. (In Russ., abstract in Eng.)

9. Surkov V.G., Golovko A.K., Mozhayskaya M.V. [Influence of mechanical stress on the composition of oil paraffins], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Izvestiya Tomsk Polytechnic University], 2012, vol. 321, no. 3, pp. 148-152. (In Russ., abstract in Eng.)

10. Promptov M.A. [Change in the fractional composition of oil during hydro-pulse cavitation treatment], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 3, pp. 412-419, doi: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.412-419 (In Russ., abstract in Eng.)

11. Promptov M.A. [Hydropulse cavitation oil treatment in a rotary pulse apparatus], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 3, pp. 455-460, doi: 10.17277/vestnik.2018.03.pp.455-460 (In Russ., abstract in Eng.)

12. Torkhovskiy V.N., Vorob'yev S.I., Yegorova Ye.V., Antonyuk S.N., Gorodskiy S.N. [Transformation of alkanes under the action of a single impulse of hydrodynamic cavitation. II. The behavior of mid-chain alkanes $C_{21} - C_{38}$], *Vestnik MITKHT im. M. V. Lomonosova* [Bulletin of the Moscow Institute of Fine Arts M.V. Lomonosov], 2014, vol. 9, no. 4, pp. 59-69. (In Russ., abstract in Eng.)

13. Torkhovskiy V.N., Vorob'yev S.I., Antonyuk S.N., Yegorova Ye.V., Ivanov S.V., Kravchenko V.V., Gorodskiy S.N. [The use of multi-cycle cavitation to intensify the processing of oil raw materials], *Tekhnologii nefii i gaza* [Oil and gas technology], 2015, no. 2 (97), pp. 9-17. (In Russ., abstract in Eng.)

14. Torkhovskiy V.N., Antonyuk S.N., Vorob'yev S.I., Nikolayeva M.V. [Transformation of short-chain n-alkanes under the influence of hydrodynamic cavitation], *Tonkiye khimicheskiye tekhnologii* [Thin chemical technologies], 2017, vol. 12, no. 5, pp. 65-70. (In Russ., abstract in Eng.)

15. Tumanyan B.P. *Nauchnyye i prikladnyye aspekty teorii neftyanykh dispersnykh sistem* [Scientific and applied aspects of the theory of oil dispersed systems], Moscow: OOO «TUMA GRUPP»; Izdatel'stvo «Tekhnika», 2000, 336 p. (In Russ.)

16. Syunyayev Z.I., Safiyeva R.Z., Syunyayev R.Z. *Neftyanyye dispersnyye sistemy* [Oil disperse systems], Moscow: Khimiya, 1990, 226 p. (In Russ.)

17. Yakimenko K.Yu., Vengerov A.A., Brand A.E. [Application of the technology of hydrodynamic cavitation treatment of high-viscosity oils in order to increase the efficiency of transportation], *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental research], 2016, no. 5-3, pp. 531-536. (In Russ., abstract in Eng.)

18. Mullakayev M.S., Abramov V.O., Bayazitov V.M., Baranov D.A., Novotortsev V.M., Yermenko I.L. [The study of the effects of cavitation on the rheological properties of heavy oil], *Oborudovaniye i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa* [Equipment and technologies for the oil and gas complex], 2011, no. 5, pp. 24-27. (In Russ., abstract in Eng.)

19. Khafizov F.Sh., Krasnov A.V. [Saturated vapor pressure for petroleum products], *Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Neftegazovoye delo»* [Electronic scientific journal "Oil and Gas Business"], 2012, no. 3, pp. 406-413. (In Russ., abstract in Eng.)

20. Shramm G., Kulichikhin V.G. [Ed.] *Osnovy prakticheskoy reologii i reometrii: monografiya* [Fundamentals of practical rheology and rheometry: monograph], Moscow: KolosS, 2003, 312 p. (In Russ.)

Wirkung der Hydroimpulsbehandlung auf die rheologischen Parameter des Öls

Zusammenfassung: Es ist die Möglichkeit untersucht, die rheologischen Eigenschaften von viskosem Öl durch Hydro-Pulskavitationsbehandlung zu verändern. Es ist ein Mechanismus vorgeschlagen, der die Änderung der Struktur komplexer Struktureinheiten von Öl infolge der Exposition gegenüber Kavitation erklärt. Durchgeführt sind experimentelle Studien zur Verarbeitung von viskosem Öl in einem hydrodynamischen Kavitator mit Stanton-Düsen. Die Analyse der rheologischen Eigenschaften zeigte, dass die Abnahme der Viskosität des verarbeiteten Öls 50 % erreicht.

Influence du traitement par impulsion hydraulique sur les paramètres rhéologiques du pétrole

Résumé: Est étudiée la possibilité de modifier les propriétés rhéologiques de l'huile visqueuse par le traitement de cavitation par impulsion hydraulique. Est proposé un mécanisme qui explique le changement de la structure des unités structurales complexes de l'huile résultant de l'action de la cavitation. Sont réalisées des études expérimentales sur le traitement de l'huile visqueuse dans un cavitateur hydrodynamique avec des buses de Stanton. L'analyse des caractéristiques rhéologiques a montré que la réduction de la viscosité de l'huile traitée atteint 50 %.

Авторы: *Промтов Максим Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», декан факультета международного образования; *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Борщев Вячеслав Яковлевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Колиух Александр Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Степанов Андрей Юрьевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Шеина Ольга Александровна* – кандидат химических наук, старший педагог дополнительного образования кафедры «Общетеоретические дисциплины», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

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

THE INFLUENCE OF PHYSICAL FIELDS ON KINETIC COEFFICIENTS IN THE PROCESS OF EXTRACTING CONTAMINANTS FROM FABRIC

M. K. Kosheleva, M. Z. Tsintsadze

*Department of Energy and Resource Effective Technologies,
Industrial Ecology and Safety, otxpaxt@yandex.ru;
The Kosygin State University of Russia, Moscow, Russia*

Keywords: cotton fabric; extraction; high voltage pulses; kinetics; ultrasonic field.

Abstract: A quantitative assessment of the influence of the ultrasonic field and electric discharges, initiated by high voltage pulses in the working solution, on the kinetic coefficients in the process of extraction of contaminants from cotton fabric. The results can be used in kinetic calculations of the intensified processes of extraction of contaminants from fabric.

The aim of the paper is to study and quantify the effect of physical fields – ultrasonic field and electric discharges in a liquid initiated by high voltage pulses – on kinetic coefficients in the process of extraction of technological contaminants from cotton fabric when it is washed after mercerization.

In the chemical technology of finishing fabrics, their washing from various technological contaminants is in many respects determining the quality of the finished material by energy-consuming operation, which accompanies almost every technological stage in the chemical technology of finishing fabrics [1, 2].

Process contaminants (non-fixed dyes, printing ink, surfactants, alkali, fatty substances, etc.) are contained in the fabric not only on its surface, but also inside it, therefore, washing the fabric is, from the physicochemical point of view, the extraction of the target component (distributed substance) from the fabric [1, 2].

Improving the efficiency of the washing process due to its intensification is a necessary condition to reduce the consumption of clean washing water and chemicals, in particular surfactants, the amount of wastewater, energy costs for the process [1 – 3].

In [4 – 9], mathematical models of the processes of extraction of technological contaminants from various materials, including fabrics and fibers, were developed. However, the studies of the kinetics of the mass transfer process of washing fabrics and a quantitative assessment of its intensification in different ways were practically not conducted.

A number of studies show that ultrasonic exposure allows intensifying the extraction of technological contaminants from textile materials [1 – 3].

It is also known that the effect of electric discharges makes it possible to intensify the processes of extraction of various substances, in particular, from plant materials, which is shown in a number of works [10 – 12]. There are separate publications on the intensification by this method of the processes of extraction of technological contaminants from fibrous materials, for example, in the primary processing of wool.

A quantitative assessment of the influence of physical fields on the kinetics of the process of extracting technological contaminants from tissues is necessary because it can be used to calculate the performance of washing equipment, assess energy and energy savings, and increase the environmental safety of the intensified washing process by reducing the contamination of wastewater with chemical reagents.

In the study, the kinetic coefficients were determined on the basis of experimental washing kinetics curves obtained on model plants without intensification and with intensification of the process by selected physical fields.

The object of investigation of the effect of the ultrasonic field on the washing kinetics was a cotton fabric with a surface density of $M = 0.340 \text{ kg/m}^2$ – a typical medium-density cotton fabric.

Laboratory studies were carried out at the department of Processes and apparatuses of chemical technologies of the Kosygin Moscow State Technical University. The model installation was a washing bath with piezoelectric transducers fixed in the bottom and a feeding ultrasonic generator with an operating frequency of 35 kHz and a power consumption of 90 watts.

In the experiments, washing of the cotton fabric was carried out from sodium hydroxide, since the fabric is treated with alkali in the process of its mercerization. A fabric sample was impregnated with a sodium hydroxide solution with a concentration of 100 kg/m^3 , the impregnation time was longer than the equilibrium time, and the alkali concentration was determined by the method of back titration [1, 2].

On the experimental curves of the washing kinetics, two periods of the process were observed, which is typical for washing cotton fabrics of various densities from alkali both during flow and when filtering a washing solution through a fabric web [1, 2, 13, 14].

The concentration of the process contamination in the fabric in the second washing period, which was divided into 4 zones during calculations, varied from $0.1200 \text{ kg/(kg of dry material)}$ to $0.0364 \text{ kg/(kg of dry material)}$.

The kinetics of the washing process of a typical lightweight cotton fabric after mercerization under the influence of electric discharges initiated by high voltage pulses in a working washing solution, the influence of this physical field on the kinetic coefficients of mass transfer and mass conductivity were studied during alkali extraction.

The object of the study was cotton fabric with a surface density of $M = 0.150 \text{ kg/m}^2$ – a typical lightweight cotton fabric after its mercerization. In experimental studies, the same methods were used as when exposed to an ultrasonic field.

The experimental studies were carried out in the laboratories of the Department of Physics of the Pyatigorsk Medical and Pharmaceutical Institute (branch of the Volgograd State Medical University) and in the laboratory of General chemical technology of the department of Processes and apparatuses of chemical technologies of the Kosygin Moscow State Technical University. To initiate an electric discharge in aqueous wash solutions with a sufficiently high conductivity, a high voltage pulse with a short front and a limited duration was used. The high-voltage generator designed and manufactured at the Pyatigorsk Medical and Pharmaceutical Institute at the Department of Physics made it possible to obtain a voltage pulse with an amplitude of up to 50 kV with a front $t_f = 0.1 \text{ } \mu\text{s}$ and a pulse duration $t_i = 0.8 \text{ } \mu\text{s}$ [10 – 12].

Similar to the ultrasound exposure, two periods of the process were observed on the experimental washing kinetics curves, while the effect of electric discharges causes an intensification of the process in both the first and second periods of the process.

The concentration of the process contamination in the fabric in the second washing period, which was divided into 3 zones during calculations, varied from $0.0838 \text{ kg/(kg of dry material)}$ to $0.01925 \text{ kg/(kg of dry material)}$.

In [15], a modified method was developed for determining the mass transfer coefficient of material β_c and the dependence $k = f(u)$ from the kinetic curve of the washing process, which consists of two periods, which does not require the exclusion of external diffusion resistance in the latter case.

This method was used to calculate the kinetic coefficients of the studied fabrics during the washing process. Kinetic coefficients for washing without intensification and using the studied physical fields were calculated from the experimental kinetics curves of the process.

As noted above, two periods of the process are observed on the washing kinetics curves without intensification and with intensification by fields. From the linear section of the kinetics curves, on which the process is controlled by external diffusion and, therefore, obeys the mass transfer equation, mass transfer coefficients are determined.

The mass conductivity coefficients of the material were determined by dividing a section of the kinetic curve (at a concentration less than critical) into concentration zones, in each of which the coefficients are considered constant [15].

Tables 1 – 8 show the coefficients of mass transfer and mass conductivity of the studied fabrics when they are washed without intensification and with intensification using an ultrasonic field – ultrasound and electric discharges – ED.

Tables 1, 2, 6, 7 show the calculated values of the mass transfer *Bio* criterion – Bi_m .

The fact that the effect of the studied physical fields intensifies the washing process both in the first period and in the second is reflected in the values of the kinetic coefficients of mass transfer and mass conductivity, as can be seen from Tables 1 – 8.

Table 1

Mass transfer coefficients during washing without intensification and with ultrasound		
Washing	with ultrasound	without ultrasound
$\beta_c, \text{ m/s}$	$4.72 \cdot 10^{-5}$	$2.67 \cdot 10^{-5}$

Table 2

Mass conductivity coefficients k calculated by the zonal method for medium density cotton fabric during washing without ultrasound				
Concentration zone number	1	2	3	4
$k_i \cdot 10^9, \text{ m}^2/\text{s}$	0.86	0.54	0.59	0.55
Bi_m	24.6	39.4	36.2	38.8

Table 3

Mass conductivity coefficients k calculated by the zonal method for medium density cotton fabric during washing with ultrasound				
Concentration zone number	1	2	3	4
$k_i \cdot 10^9, \text{ m}^2/\text{s}$	1.32	1.01	0.79	0.53
Bi_m	28.5	37.36	47.6	70.6

Table 4

Comparison of the coefficients of mass conductivity during washing without intensification and with ultrasound

Concentration zone number		1	2	3	4
$k_i \cdot 10^9, \text{m}^2/\text{s}$	with ultrasound	1.32	1.01	0.79	0.53
$k_i \cdot 10^9, \text{m}^2/\text{s}$	without ultrasound	0.86	0.54	0.59	0.55

Table 5

Mass transfer coefficients during washing without intensification and with exposure of ED

Washing	without ED	with ED
$\beta_c, \text{m/s}$	$1,377 \cdot 10^{-5}$	$2,55 \cdot 10^{-5}$

Table 6

Mass conductivity coefficients k calculated by the zonal method for cotton fabric when washing without exposure of ED

Concentration zone number	1	2	3
$k_i \cdot 10^{10}, \text{m}^2/\text{s}$	3,351	0,682	0,498
Bi_m	16,0	78,7	108,0

Table 7

Mass conductivity coefficients k calculated by the zonal method for cotton fabric when washing with exposure of ED

Concentration zone number	1	2	3
$k_i \cdot 10^{10}, \text{m}^2/\text{s}$	4.862	0.937	0.711
Bi_m	20.4	106.0	139.5

Table 8

Mass conductivity coefficients during washing without intensification and with ED

Concentration zone number		1	2	3
$k_i \cdot 10^{10}, \text{m}^2/\text{s}$	without ED	3.351	0.682	0.498
$k_i \cdot 10^{10}, \text{m}^2/\text{s}$	with ED	4.862	0.937	0.711

As can be seen from Table 2, the coefficient of mass conductivity of the fabric when it was washed without ultrasound was about 10^{-10} , which was consistent with the order of the values of this coefficient in the extraction of target components from the solid phase [4, 5, 9]. With a decrease in the concentration of contaminants, the mass conductivity coefficient decreased slightly. This is probably due to the fact that at the end of the process, the extracted substances were more strongly bound with the structure of the fabric.

While washing the fabric with ultrasound exposure (Table 3), its mass transfer coefficient in the first three basic concentrations was greater than that without ultrasound exposure (about 1.5 times) and it was on the order of 10^{-9} . This indicates that ultrasonic pulsation intensifies not only external but also internal mass transfer. In the last zone, the contamination (sodium hydroxide) was removed, which was firmly bound to the solid phase, so ultrasonic pulsations did not affect this connection.

Ultrasonic cavitation, acoustic flows, acoustic pressure, and other effects cause intense turbulent flows both in the entire liquid mass and near the phase boundary, which leads to a significant decrease in the thickness of the diffusion boundary layer [1, 9].

The value of the Bi_m number indicates that in the process under consideration in the second period, a mixed-diffusion mass transfer mechanism was implemented, in which both internal and external diffusion resistances influenced the process speed.

The values of the coefficients β_c and k_i can be used for analysis and kinetic calculation of the washing process of medium-density cotton fabric from sodium hydroxide.

As can be seen from Table 6, the coefficients of mass conductivity during washing of light cotton fabric without intensification were of the order of 10^{-10} , which was also consistent with the order of the values of this coefficient when extracting the target components from the solid phase.

While washing with an intensifier – ED, the coefficient of mass conductivity in the concentration zones was greater than without it (about 1.5 times).

An increase in all kinetic coefficients indicates that electric discharges, like ultrasound, intensify not only external but also internal mass transfer.

The Bio numbers given in Tables 6 and 7 indicate that in the second period of the process, a mixed-diffusion mass transfer mechanism is realized.

Conclusion

Based on experimental studies, a quantitative assessment of the influence of physical fields – an ultrasonic field and electric discharges initiated by high voltage pulses in a working solution – on the kinetic coefficients of mass transfer and mass conductivity during washing of light typical cotton fabric and typical medium density cotton fabric after mercerization is given. It is shown that the studied physical fields intensify mass transfer both in the first and in the second periods of the washing process. The values of kinetic coefficients can be used for analysis and kinetic calculation of extraction (washing) processes in the chemical technology of finishing textile materials.

References

1. Kosheleva M.K. *Protsessy i apparaty tekstil'nykh tekhnologiy v primerakh, laboratornykh rabotakh i testakh: uchebnoe posobiye* [Processes and apparatuses of textile technologies in examples, laboratory works and tests: textbook. allowance], Moscow: INFRA-M, 2019, 321 p. (In Russ.)
2. Kosheleva M.K., Shchegolev A.A., Shatskikh S.N., Apal'kova M.S. [Intensification of washing processes with the application of ultrasonic fields], *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti* [University proceedings. Technology of the textile industry], 2012, no. 3 (339), pp. 113-117. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Kosheleva M.K. [Improving the production and environmental safety of the finishing production of fine-woven factories by improving technology], *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti* [University proceedings. Technology of the textile industry], 2005, no. 2 (283), pp. 100-105. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Pavlyukevich N.V. *Vvedeniye v teoriyu teplo- i massoperenosa v poristyykh sredakh* [Introduction to the theory of heat and mass transfer in porous media], Minsk: ITMO NAN RB, 2003, 140 p. (In Russ.)
5. Aksel'rud G.A. *Massoobmen v sisteme tverdoe telo – zhidkost'* [Mass transfer in a solid-liquid system], Lviv: Izdatel'stvo L'vovskogo universiteta, 1970, 187 p. (In Russ.)
6. Rudobashta S.P., Kosheleva M.K., Kartashov E.M. Mathematical Simulation of the Extraction of a Blending Agent from Cylindrical Bodies in the Semicontinuous Regime, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2016, vol. 89, no. 3, pp. 606-613, doi: 10.1007/s10891-016-1417-5
7. Rudobashta S.P., Kosheleva M.K., Kartashov E.M. Modeling of the Extraction of a Target Component from Bodies of Spherical Shape in a Semicontinuous Process, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2017, vol. 90, no. 4, pp. 797-805, doi: 10.1007/s10891-017-1628-4
8. Rudobashta S.P., Kosheleva M.K., Kartashov E.M. Nonstationary Mass Transfer Near the Surface of a Cylindrical Body, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2015, vol. 88, no. 6, pp. 1320-1328, doi: 10.1007/s10891-015-1316-1
9. Romankov P.G., Kurochkina M.I. *Ekstragirovaniye iz tverdykh materialov* [Extraction from solid materials], Leningrad: Khimiya, 1983, 256 p. (In Russ.)
10. Kazub V.T., *PhD Dissertation (Technical)*, Pyatigorsk, 2002, 345 p. (In Russ.)
11. Kazub V.T., Koshkarova A.G., Tolmacheva A.K. *Ustroystvo dlya polucheniya ekstrakta iz sofory yaponskoy* [Device for producing extract from Japanese sophora], Russian Federation, 2019, Pat. 2692375. (In Russ.)
12. Kazub V.T., Koshkarova A.G. [Intensification of extraction processes by a pulsed electric field of high tension], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 3, pp. 496-501. (In Russ., abstract in Eng.)
13. Kosheleva M.K., Shatskikh S.N. [Energy-saving mode of extraction of technological pollution from woolen cloths], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 3, pp. 584-592. (In Russ., abstract in Eng.)
14. Reutskiy V.A., Shchegolev A.A., Kosheleva M.K. [Calculation of the washing process during filtration of the washing solution through the fabric], *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti* [University proceedings. Technology of the textile industry], 1984, no. 5, pp. 50-54. (In Russ.)
15. Rudobashta S.P., Kosheleva M.K. [Determination of mass transfer and mass-conductivity coefficients from kinetics curves], *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti* [University proceedings. Technology of the textile industry], 2015, no. 6 (360), pp. 175-180. (In Russ., abstract in Eng.)

**Влияние физических полей на кинетические коэффициенты
в процессе экстрагирования технологических загрязнений
из волокнистых материалов**

М. К. Кошелева, М. З. Цинцадзе

*Кафедра «Энергоресурсоэффективные технологии,
промышленная экология и безопасность», oхtraxt@yandex.ru;
ФГБОУ ВО «Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство)», г. Москва, Россия*

Ключевые слова: импульсы высокого напряжения; кинетика; ультразвуковое поле; хлопчатобумажная ткань; экстрагирование.

Аннотация: Проведена количественная оценка влияния ультразвукового поля и электрических разрядов, инициируемых импульсами высокого напряжения в рабочем растворе, на кинетические коэффициенты в процессе экстрагирования технологического загрязнения из хлопчатобумажных тканей. Полученные результаты могут использоваться в кинетических расчетах интенсифицированных процессов экстрагирования технологических загрязнений из тканей.

Список литературы

1. Кошелева, М. К. Процессы и аппараты текстильных технологий в примерах, лабораторных работах и тестах : учеб. пособие / М. К. Кошелева. – М. : ИНФРА-М, 2019. – 321 с.
2. Интенсификация процессов промывки с наложением ультразвуковых полей / М. К. Кошелева, А. А. Щеголев, С. Н. Шацких, М. С. Апалькова // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012. – № 3 (339). – С. 113 – 117.
3. Кошелева, М. К. Повышение производственной и экологической безопасности отделочного производства тонкосуконных фабрик за счет совершенствования технологии / М. К. Кошелева // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2005. – № 2 (283). – С. 100 – 105.
4. Павлюкевич, Н. В. Введение в теорию тепло- и массопереноса в пористых средах / Н. В. Павлюкевич. – 2-е изд. – Минск : ИТМО НАН РБ, 2003. – 140 с.
5. Аксельруд, Г. А. Массообмен в системе твердое тело – жидкость / Г. А. Аксельруд. – Львов : Изд-во Львовского университета, 1970. – 187 с.
6. Rudobashta, S. P. Mathematical Simulation of the Extraction of a Blending Agent from Cylindrical Bodies in the Semicontinuous Regime / S. P. Rudobashta, M. K. Kosheleva, E. M. Kartashov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2016. – Vol. 89, No. 3. – P. 606 – 613. doi: 10.1007/s10891-016-1417-5
7. Rudobashta, S. P. Modeling of the Extraction of a Target Component from Bodies of Spherical Shape in a Semicontinuous Process / S. P. Rudobashta, M. K. Kosheleva, E. M. Kartashov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2017. – Vol. 90, No. 4. – P. 797 – 805. doi: 10.1007/s10891-017-1628-4
8. Rudobashta, S. P. Nonstationary Mass Transfer Near the Surface of a Cylindrical Body / S. P. Rudobashta, M. K. Kosheleva, E. M. Kartashov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2015. – Vol. 88, No. 6. – P. 1320 – 1328. doi: 10.1007/s10891-015-1316-1
9. Романков, П. Г. Экстрагирование из твердых материалов / П. Г. Романков, М. И. Курочкина. – Л. : Химия, 1983. – 256 с.
10. Казуб, В. Т. Кинетика и основы аппаратного оформления процессов электроразрядного экстрагирования биологически активных соединений : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.08 / Казуб Валерий Тимофеевич. – Пятигорск, 2002. – 345 с.
11. Пат. 2692375 Российская Федерация, МПК B01J 19/08, B01D 11/00. Устройство для получения экстракта из софоры японской / В. Т. Казуб, А. Г. Кошкарлова, А. К. Толмачева ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный медицинский университет». – № 2018124418 ; заявл. 03.07.2018 ; опубл. 24.06.2019, Бюл. 18. – 7 с.
12. Казуб, В. Т. Интенсификация процессов экстрагирования импульсным электрическим полем высокой напряженности / В. Т. Казуб, А. Г. Кошкарлова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 3. – С. 496 – 501.
13. Кошелева, М. К. Энергоресурсосберегающий режим экстракции технологических загрязнений из шерстяных полотен / М. К. Кошелева, С. Н. Шацких // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 3. – С. 584 – 592.

14. Реутский, В. А. Расчет процесса промывки при фильтрации моющего раствора сквозь полотно ткани / В. А. Реутский, А. А. Щеголев, М. К. Кошелева // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1984. – № 5. – С. 50 – 54.

15. Рудобашта, С. П. Определение коэффициентов массоотдачи и массопроводности из кривых кинетики / С. П. Рудобашта, М. К. Кошелева // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015. – № 6 (360). – С. 175 – 180.

Auswirkungen von physikalischen Feldern auf kinetische Koeffizienten im Prozess der Extraktion von technologischen Verunreinigungen aus faserigen Materialien

Zusammenfassung: Eine quantitative Bewertung des Einflusses des Ultraschallfeldes und der durch Hochspannungsimpulse in der Arbeitslösung ausgelösten elektrischen Entladungen auf die kinetischen Koeffizienten bei der Extraktion der technologischen Verschmutzung aus Baumwollgeweben ist durchgeführt. Die Ergebnisse können für kinetische Berechnungen intensivierter Prozesse zur Extraktion technologischer Verunreinigungen aus Geweben verwendet werden.

Influence des champs physiques sur les coefficients cinétiques lors de l'extraction des contaminants de processus à partir de matériaux fibreux

Résumé: Est effectuée une estimation quantitative de l'influence du champ ultrasonore et des décharges électriques déclenchées par des impulsions à haute tension dans la solution de travail sur les coefficients cinétiques lors de l'extraction de la contamination technologique des tissus de coton. Les résultats obtenus peuvent être utilisés dans les calculs cinétiques des processus intensifiés d'extraction des contaminants technologiques des tissus.

Авторы: *Кошелева Мария Константиновна* – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Энергоресурсоэффективные технологии, промышленная экология и безопасность»; *Цинцадзе Марина Зиевна* – аспирант кафедры «Энергоресурсоэффективные технологии, промышленная экология и безопасность», ФГБОУ ВО «Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», г. Москва, Россия.

Рецензент: *Промтов Максим Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», декан факультета международного образования, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

О ВЛИЯНИИ РЕЖИМНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БАРАБАННОГО ГРАНУЛЯТОРА-СУШИЛКИ НА ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ ПРОДУКТА

В. Я. Борщев¹, В. А. Пронин²

*Кафедры: «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность» (1),
«Технологии и оборудование пищевых и химических производств» (2),
borschov@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: барабанный гранулятор-сушилка; гранулирование; оптимизация параметров; сыпучий материал.

Аннотация: В целях оптимизации параметров технологической схемы гранулирования и сушки минеральных удобрений проведено исследование эксплуатационных параметров барабанного гранулятора-сушилки (БГС). С помощью аппарата математической статистики проведено исследование влияния режимных и конструктивных параметров аппарата БГС на гранулометрический состав материала после гранулирования. Совместный анализ матриц коэффициентов корреляции исследуемых переменных позволил разработать рекомендации по обеспечению устойчивого режима работы БГС.

Введение

Широкое применение барабанных грануляторов-сушилок (БГС) в производстве минеральных удобрений [1] обусловлено совмещением и интенсификацией процессов гранулирования, сушки и частичной классификации сыпучего материала в одном аппарате, в результате чего уменьшается количество единиц оборудования в технологической схеме производства.

Анализ технологической схемы гранулирования и сушки удобрений с применением аппарата БГС (рис. 1) свидетельствует об определяющей зависимости ее технико-экономических параметров от особенностей кинетики процесса, который происходит в зоне распыливания пульпы гранулятора-сушилки [2 – 6]. Это обусловлено тем, что нормальная эксплуатация БГС характеризуется образованием стационарных внутреннего и внешнего циркуляционных потоков гранулированного материала.

Внутренний поток, транспортирующийся с помощью обратного шнека 2, состоит преимущественно из мелких частиц, образующих в поперечном сечении барабана завесу, на которую пневматической форсункой 5 распыливается пульпа (рис. 2). Внешний поток формируется с помощью внешних транспортных устройств, которые возвращают мелкую нетоварную фракцию во внутренний циркуляционный поток на повторное циклическое орошение.

Мелкие частицы сосредотачиваются в основном во внутреннем потоке вследствие классификации образовавшихся гранул во встроенном конусном классификаторе 3 на выходе из барабана. Нетоварная фракция получается при классификации выходящего из аппарата гранулированного материала с помощью

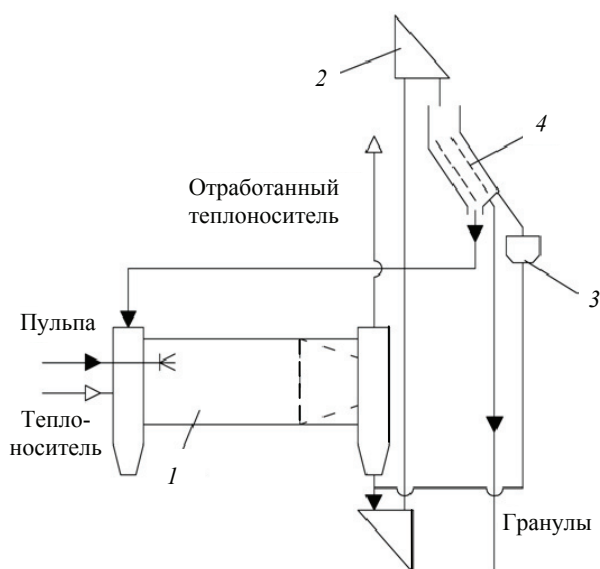


Рис. 1. Схема технологического узла гранулирования и сушки минеральных удобрений:
1 – БГС; 2 – нория; 3 – дробилка; 4 – грохот

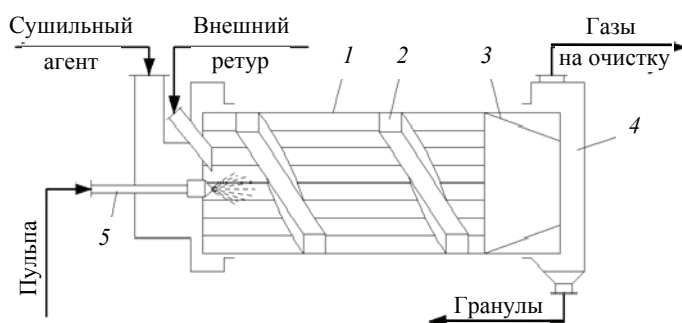


Рис. 2. Схема барабанного гранулятора-сушилки:
1 – барабан; 2 – обратный шнек; 3 – конусный классификатор;
4 – разгрузочная камера; 5 – пневматическая форсунка

вибрационного грохота. В состав нетоварной фракции входят мелкие гранулы, размер которых должен быть увеличен до размера товарной фракции, и мелкие частицы, получающиеся после измельчения крупной нетоварной фракции и отделения в результате повторной классификации.

В зависимости от особенностей кинетики процесса гранулирования и сушки, который протекает в зоне распыливания пульпы БГС, внешний и внутренний циркуляционные потоки могут значительно изменяться как качественно, так и количественно. Это оказывает существенное влияние на технико-экономические показатели работы оборудования. В частности, при увеличении внешнего потока происходит снижение данных показателей вследствие роста энергетических затрат на транспортирование и классификацию гранулированного материала. При этом одновременно увеличиваются тепловые потери и выделение пыли в производственное помещение. Значительное влияние на снижение технико-экономических показателей оказывает наличие крупной нетоварной фракции

во внешнем потоке. Это обусловлено тем, что мелкую нетоварную фракцию можно рассматривать, по сути, в виде полупродукта производства. В то же время крупную фракцию, являющуюся в определенной степени «браком производства», необходимо утилизировать. Данная операция может быть реализована с использованием таких энергоемких процессов, как измельчение, классификация и др.

Цель работы – оптимизация параметров технологической схемы гранулирования и сушки минеральных удобрений.

Экспериментальная часть

Для оптимизации параметров технологической схемы гранулирования и сушки минеральных удобрений выполнен статистический анализ взаимосвязи параметров и эксплуатационных характеристик аппарата с использованием аппарата БГС типовой конструкции, имеющего диаметр 3,2 и длину 20 м [1]. С помощью метода пошаговой множественной регрессии по стандартной программе проведен анализ двух параллельно работающих аппаратов БГС [7]. Готовый продукт в этих конструктивно аналогичных аппаратах характеризовался существенно разным гранулометрическим составом. При этом содержание товарной фракции в продукте было практически одинаковым. В то же время в нетоварной фракции на одном из них преобладали крупные гранулы, а на другом – мелкие.

С помощью аппарата математической статистики в работе проведено исследование влияния режимных и конструктивных параметров аппарата БГС на параметр оптимизации. На основании технологического назначения процесса гранулирования и сушки в качестве параметра оптимизации выбран гранулометрический состав материала после гранулирования. В качестве критерия оптимальности гранулометрического состава использован выход товарной фракции за вычетом содержания крупной фракции.

Выбор параметра оптимизации в таком виде обусловлен тем, что одна величина выхода товарной фракции не полностью соответствует требованию универсальности и полноты, так как не дает представление о процессе гранулирования в экономическом аспекте. Действительно, по экономическим соображениям, важно, какое количество крупной нетоварной фракции содержится в гранулированном материале. Это связано с тем, что измельчение и классификация крупной нетоварной фракции требуют дополнительных затрат энергии. В то же время мелкая нетоварная фракция, используемая в качестве ретура, фактически представляет собой полупродукт стадии гранулирования.

В процессе статистической обработки эксплуатационных параметров двух конструктивно аналогичных параллельно работающих промышленных БГС в производстве гранулированного аммофоса исследовано взаимное влияние 13 переменных: p_1, p_2 – температуры теплоносителя на входе и выходе аппарата соответственно; p_3, p_4, p_5 – расход, pH и влажность пульпы соответственно; p_6, p_7 – центральное и боковое давления соответственно; p_8 – номер аппарата; p_9 – комплексный параметр, характеризующий качество гранулометрического состава продукта на выходе из аппарата; p_{10} – средний диаметр гранул выходного продукта; p_{11} – дисперсия фракционного состава выходного продукта; p_{12}, p_{13} – соответственно доли крупной и мелкой нетоварной фракции в выходном продукте.

Регистрацию параметров $p_1 - p_7$ проводили с помощью заводских приборов. Параметры $p_9 - p_{13}$ определяли по отбираемым на выходе из гранулятора

проб готового продукта, которые подвергались в дальнейшем рассеиванию по фракциям. Полученные в результате кривые распределения выходного продукта по размерам обрабатывали для расчета параметров $p_{10} - p_{13}$ по известным зависимостям, а параметр p_9 определяли по формуле

$$p_9 = 1 - p_{13} - 2p_{12}.$$

В процессе исследования выполнено 100 измерений по каждому параметру. Измерения проводили сериями по три замера в каждой с промежутком между замерами, равным 10 минут. Отбор проб готового продукта осуществляли спустя примерно 0,35 часа (это среднее время пребывания гранулированного материала в барабане) после измерения переменных $p_1 - p_7$. При этом каждая серия замеров составила одно наблюдение для статистического анализа путем усреднения значений каждой переменной, что позволило исключить вероятность получения ложных корреляций. В результате для статистического анализа подготовлено 33 наблюдения о 13 переменных.

Обсуждение результатов и выводы

В результате анализа статистической информации с помощью аппарата математической статистики [7] получены матрица коэффициентов корреляций для всех 13 переменных (эксплуатационных характеристик аппарата БГС) по всем проведенным наблюдениям, средние величины переменных и их стандартные отклонения. Анализ коэффициентов корреляции между переменной p_8 и другими переменными позволил установить наличие статистически значимого различия в режимах работы обоих аппаратов. Это подтверждается тем, что коэффициенты взаимной корреляции для основных параметров при сравнительно высокой их значимости имеют для двух аппаратов БГС различные знаки. Кроме того, гранулометрический состав готового продукта как качественно, так и количественно значительно отличается для двух аппаратов. При этом готовый продукт, характеризующийся одинаковым содержанием доли товарной фракции, содержит нетоварную фракцию в одном аппарате преимущественно в виде крупных, а в другом – мелких гранул. Следовательно, полученные в результате анализа данные являются неоднородными, что, как известно, может привести к ложной корреляции. По этой причине попытки разработки общей для обоих аппаратов статистической модели не привели к положительным результатам, и грануляторы-сушилки рассмотрены по отдельности. Для каждого из них получена матрица корреляций и регрессионные уравнения, которые связывают режимные параметры с параметром оптимизации p_9 и целевыми функциями p_{10} , p_{12} , p_{13} (характеристиками гранулометрического состава).

Совместный анализ матриц коэффициентов корреляции исследуемых переменных, полученных отдельно для каждого аппарата, позволил установить разный подход к обеспечению устойчивого режима работы двух барабанных грануляторов-сушилок. Так, например, корреляционная зависимость температуры теплоносителя на входе и расхода пульпы для БГС-1 положительна, а для БГС-2 – отрицательна. Следовательно, для БГС-1 при росте температуры теплоносителя расход пульпы увеличивается, а для БГС-2 – наоборот уменьшается. Также имеют противоположные знаки и в то же время значимую абсолютную величину коэффициенты корреляции между расходом пульпы и параметром оптимизации p_9 . Установленные различия коэффициентов корреляции свидетельствуют о том, что в качестве основного фактора, который определяет это различие, следует рас-

смаатривать влияние неучтенных случайно возникающих конструктивных особенностей аппаратов. Очевидно, что соответствующие конструктивные особенности должны существенно влиять на условия взаимодействия потока диспергированной пульпы и падающего слоя частиц. Это в полной мере подтверждается результатами исследований, представленных в работах [8, 9].

Анализ взаимосвязи параметра оптимизации p_9 и целевых функций p_{12} , p_{13} с режимными параметрами выполнен с применением аппарата пошаговой множественной регрессии [7]. В результате расчетов получены уравнения, описывающие зависимость параметра оптимизации и целевых функций (характеристик гранулометрического состава) от переменных $p_1 - p_7$ для каждого аппарата БГС. Ниже приведены уравнения регрессии только для параметров p_9 и p_{12} :

– для БГС-1

$$p_9 = 0,337 - 0,0141p_3 + 0,0037p_2 + 0,0084p_5 + 0,011p_6;$$

$$p_{12} = -0,015 + 0,0066p_3 - 0,001p_2 + 0,02p_7;$$

– для БГС-2

$$p_9 = 0,412 + 0,0386p_3 + 0,263p_7 - 0,345p_4 - 0,0247p_5 + 0,00129p_1;$$

$$p_{12} = 0,028 + 0,001p_3 - 0,026p_7 + 0,00015p_1.$$

Анализ полученных уравнений свидетельствует, что увеличение параметров оптимизации на БГС-1 можно обеспечить путем уменьшения расхода пульпы, а на БГС-2 – путем его увеличения.

Проведенный статистический анализ результатов наблюдений также показал, что множественные коэффициенты регрессии малы. Вследствие этого управление гранулометрическим составом материала в промышленных условиях потребует значительного изменения основных режимных характеристик (температуры, расхода пульпы, сжатого воздуха и т.д.), что может стать причиной повышения нестабильности работы аппарата и снижения его производительности.

Анализ литературных источников [2 – 6] с учетом кинетических закономерностей гранулообразования в БГС позволяет сделать вывод о том, что эффективным способом повышения технико-экономических показателей функционирования технологической линии (см. рис. 1) может быть использование принципа управления сегрегированными потоками неоднородных частиц [10 – 15]. Применение данного принципа позволит управлять потоками частиц различного размера, обеспечивая концентрирование мелких из них в зоне гранулообразования в головной части барабана и вывод достаточно крупных товарных гранул из аппарата. В результате представляется возможным свести к минимуму величину потока ретур в во внешнем циркуляционном контуре при соответствующем снижении энергозатрат.

Список литературы

1. Классен, П. В. Гранулирование / П. В. Классен, И. Г. Гришаев, И. П. Шомин. – М. : Химия, 1991. – 240 с.
2. Математическая модель процесса гранулирования в барабанном грануляторе-сушилке / С. П. Рудобашта, В. Я. Борщев, В. Н. Долгунин, А. А. Уколов // Теоретические основы химической технологии. – 1986. – Т. 20, № 4. – С. 441 – 446.
3. Хабарова, Е. В. К расчету вероятности столкновения капель пульпы с гранулами завесы в аппарате БГС / Е. В. Хабарова, В. Н. Долгунин, В. Я. Борщев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1995. – Т. 1, № 3-4. – С. 304 – 310.

4. Долгунин, В. Н. Моделирование процесса гранулирования в барабанном грануляторе-сушилке (БГС) / В. Н. Долгунин, В. Я. Борщев, Е. В. Хабарова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 1997. – № 4. – С. 7 – 11.
5. Долгунин, В. Н. Взаимодействие газожидкостного потока с падающим слоем частиц материала в барабанном грануляторе-сушилке / В. Н. Долгунин, Е. В. Хабарова, В. Я. Борщев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1997. – Т. 3, № 4. – С. 257 – 262.
6. Хабарова, Е. В. Моделирование динамики процесса гранулирования в барабанных грануляторах-сушилках / Е. В. Хабарова, В. Я. Борщев, В. Н. Долгунин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2002. – Т. 8, № 2. – С. 240 – 245.
7. Сборник научных программ на Фортране : руководство для программиста. Вып. 1. Статистика / пер. с англ. С. Я. Виленкина. – М. : Статистика, 1974. – 316 с.
8. Оценка гидромеханики движения материала в барабанном грануляторе-сушилке и совершенствование его конструкции / В. Н. Долгунин, В. Я. Борщев, А. А. Уколов [и др.] // Химическая промышленность. – 1986. – Т. 63, № 7. – С. 422 – 425.
9. Иванов, О. О. Эффекты разделения частиц в завесе барабанного насадочного аппарата / О. О. Иванов, В. Я. Борщев, В. Н. Долгунин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – № 8. – С. 13 – 15.
10. Технологические возможности управления структурой потоков в барабанном теплообменном аппарате / В. Н. Долгунин, О. О. Иванов, А. Н. Куди [и др.] // Химическая технология. – 2012. – Т. 13, № 10. – С. 600 – 606.
11. Dolgunin, V. N. Processing of Nonuniform Granular Materials in Operation Segregated Flows / V. N. Dolgunin, O. O. Ivanov, A. A. Ukolov // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 2. – С. 321 – 327.
12. Повышение эффективности барабанного аппарата путем управления сегрегированными потоками зернистых материалов / О. О. Иванов, А. Н. Куди, В. Н. Долгунин, Ю. В. Шарый // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2011. – № 2-3 (320-321). – С. 89 – 92.
13. Процессы переработки зернистых материалов в управляемых сегрегированных потоках / В. Н. Долгунин, О. О. Иванов, А. А. Уколов, А. Н. Куди // Теоретические основы химической технологии. – 2014. – Т. 48, № 4. – С. 303 – 313. doi: 10.7868/S0040357114040010
14. Долгунин, В. Н. Процессы и оборудование для переработки зернистых материалов в управляемых сегрегированных потоках : монография / В. Н. Долгунин, О. О. Иванов. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2011. – 120 с.
15. Долгунин, В. Н. Процессы и оборудование с управляемыми сегрегированными потоками дисперсной твердой фазы / В. Н. Долгунин // Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф., 08–09 сентября 2016 г., Москва. – М., 2016. – Т. 1. – С. 67 – 75.

The Influence of Mode and Design Parameters of the Drum Granulator-Dryer on the Fractional Composition of the Product

V. Ya. Borshchev¹, V. A. Pronin²

*Departments of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety (1),
Technologies and Equipment for Food and Chemical Industries (2),
borshchov@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: drum granulator-dryer; granulation; parameter optimization; bulk material.

Abstract: In order to optimize the parameters of the technological scheme of granulation and drying of mineral fertilizers, a study was made of the operational parameters of a drum granulator-dryer. Using the apparatus of mathematical statistics, a study was made of the influence of the operational and structural parameters of the apparatus of the drum granulator-dryer on the particle size distribution of the material after granulation. A joint analysis of the matrices of correlation coefficients of the studied variables made it possible to develop recommendations for ensuring a stable operation of the drum granulator-dryer.

References

1. Klassen P.V., Grishayev I.G., Shomin I.P. *Granulirovaniye* [Granulation], Moscow: Khimiya, 1991, 240 p. (In Russ.)
2. Rudobashta S.P., Borshchev V.Ya., Dolgunin V.N., Ukolov A.A. [A mathematical model of the granulation process in a drum granulator-dryer], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Technology], 1986, vol. 20, no. 4, pp. 441-446. (In Russ.)
3. Khabarova Ye.V., Dolgunin V.N., Borshchev V.Ya. [On the calculation of the probability of collision of pulp drops with the curtain granules in the apparatus of the BGS], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 1995, vol. 1, no. 3-4, pp. 304-310. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Dolgunin V.N., Borshchev V.Ya., Khabarova Ye.V. [Modeling of the granulation process in a drum granulator-dryer (BGS)], *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 1997, no. 4, pp. 7-11. (In Russ.)
5. Dolgunin V.N., Khabarova Ye.V., Borshchev V.Ya. [Interaction of a gas-liquid flow with a falling layer of material particles in a drum granulator-dryer], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 1997, vol. 3, no. 4, pp. 257-262. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Khabarova Ye.V., Borshchev V.Ya., Dolgunin V.N. [Modeling the dynamics of the granulation process in drum granulators / dryers], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2002, vol. 8, no. 2, pp. 240-245. (In Russ., abstract in Eng.)
7. *Sbornik nauchnykh programm na Fortrane: rukovodstvo dlya programmista. Vyp. 1. Statistika* [Collection of scientific programs on Fortran: a guide for the programmer. Vol. 1. Statistics], Moscow: Statistika, 1974, 316 p. (In Russ.)
8. Dolgunin V.N., Borshchev V.Ya., Ukolov A.A., Budantsev V.I., Kuznetsov V.I., Senatorov Yu.P., Volkov V.V. [Evaluation of the hydromechanics of material movement in a drum granulator-dryer and improvement of its design], *Khimicheskaya promyshlennost'* [Chemical industry], 1986, vol. 63, no. 7, pp. 422-425. (In Russ.)
9. Ivanov O.O., Borshchev V.Ya., Dolgunin V.N. [Effects of particle separation in the curtain of a drum nozzle], *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and Oil and Gas Engineering], 2009, no. 8, pp. 13-15. (In Russ.)
10. Dolgunin V.N., Ivanov O.O., Kudi A.N., Ukolov A.A., Karev V.I. [Technological capabilities of controlling the structure of flows in a drum heat and mass transfer apparatus], *Khimicheskaya tekhnologiya* [Chemical Technology], 2012, vol. 13, no. 10, pp. 600-606. (In Russ.)
11. Dolgunin V.N., Ivanov O.O., Ukolov A.A. Processing of Nonuniform Granular Materials in Operation Segregated Flows, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 2, pp. 321-327. (In Eng., abstract in Russ.)
12. Ivanov O.O., Kudi A.N., Dolgunin V.N., Sharyy Yu.V. [Improving the efficiency of the drum apparatus by controlling segregated flows of granular materials], *Izvestiya vysshihkh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya* [News of higher educational institutions. Food technology], 2011, no. 2-3 (320-321), pp. 89-92. (In Russ.)

13. Dolgunin V.N., Ivanov O.O., Ukolov A.A., Kudi A.N. [Processes for the processing of granular materials in controlled segregated flows], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Technology], 2014, vol. 48, no. 4, pp. 303-313, doi: 10.7868/S0040357114040010 (In Russ., abstract in Eng.)

14. Dolgunin V.N., Ivanov O.O. *Protsessy i oborudovaniye dlya pererabotki zernistykh materialov v upravlyayemykh segregirovannykh potokakh: monografiya* [Processes and equipment for the processing of granular materials in controlled segregated flows: monograph], Tambov: Izdatel'stvo TGTU, 2011, 120 p. (In Russ.)

15. Dolgunin V.N. *Povysheniye effektivnosti protsessov i apparatov v khimicheskoy i smezhnykh otraslyakh promyshlennosti* [Improving the efficiency of processes and apparatuses in the chemical and related industries], Proceedings of the International Scientific and Technical conferences, 08-09 September, 2016, Moscow, 2016, vol. 1, pp. 67-75. (In Russ.)

Über den Einfluss von Modus-und Konstruktionsparametern des Trommel-Granulator-Trockners auf fraktionierte Zusammensetzung des Produkts

Zusammenfassung: Um die Parameter des technologischen Schemas der Granulierung und Trocknung von Mineraldüngern zu optimieren, wurden die Betriebsparameter des Trommelgranulator-trockners untersucht. Unter Verwendung des Apparats der mathematischen Statistik wurde die Untersuchung des Einflusses der Betriebs- und Strukturparameter des Gerätes auf die Partikelgrößenverteilung des Materials nach der Granulierung durchgeführt. Die gemeinsame Analyse der Matrizen der Korrelationskoeffizienten der untersuchten Variablen ermöglichte es, Empfehlungen zur Gewährleistung der stabilen Betriebsart des Trommelgranulator-trockners zu entwickeln.

Sur l'influence des paramètres de mode et de conception du granulateur à tambour-sécheur sur la composition fractionnée du produit

Résumé: Afin d'optimiser les paramètres du schéma technologique de granulation et de séchage des engrais minéraux, est réalisée une étude des paramètres de fonctionnement du granulateur-sécheur à tambour. À l'aide d'un appareil de statistiques Mathématiques, est réalisée une étude sur l'influence des paramètres de mode et de conception de l'appareil BGS sur la composition granulométrique du matériau après la granulation. L'analyse conjointe des matrices des coefficients de la corrélation des variables étudiées a permis d'élaborer des recommandations pour assurer un fonctionnement stable du granulateur-sécheur à tambour.

Авторы: *Борщев Вячеслав Яковлевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Пронин Василий Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

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

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК НАНОФИЛЬТРАЦИОННЫХ МЕМБРАН
ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ РАСТВОРОВ
ПРОЦЕССА ЦИНКОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА
НИТРАТА АММОНИЯ**

**Д. Н. Коновалов, С. И. Лазарев, С. В. Ковалев, П. Луа,
Е. И. Горелова, О. А. Ковалева, М. И. Михайлин, А. А. Левин**

*Кафедра «Механика и инженерная графика», geometry@mail.nnn.tstu.ru;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: мембрана; разделение; раствор; трансмембранное давление; удельный выходной поток.

Аннотация: Представлен анализ технологических и промышленных растворов, сточных вод гальванических линий и производств нитрата аммония. Отмечено, что компонентный состав ионов в технологических растворах и сточных вод может варьироваться на производстве в заданном интервале в течение года. Проведенные исследования по электронанофильтрационному разделению технологических растворов процесса цинкования и производства нитрата аммония показали, что удельный выходной поток для прикатодных и прианодных мембран, коэффициент задержания зависят от накладываемой на электромембранную систему плотности постоянного электрического тока, трансмембранного давления. На основе проведенных экспериментов и полученных при этом данных по коэффициенту задержания, удельному выходному потоку через исследуемые нанофильтрационные мембраны предложены модернизированные технологические схемы разделения технологических растворов и сточных вод (нанесения защитных покрытий и производства нитрата аммония) с применением баромембранных и электромембранных технологий.

Сточные воды промышленных производств классифицируются по составу на следующие укрупненные группы: производственные – полученные при обработке полезных ископаемых (углеводородов, руды и др.) и образованные в результате технологического процесса; бытовые – в результате хозяйственной деятельности (санитарные узлы, душевые, моечные и др.); атмосферные – в результате природных явлений (дождь, таяние града и снега) [1].

К первой группе сточных вод относятся загрязненные и незагрязненные (условно чистые) [1].

Загрязненные сточные воды промышленных производств делятся на подгруппы, содержащие:

– минеральные компоненты (рудодобывающая, угледобывающая промышленность, машиностроительные и металлургические производства; промышленные предприятия, выпускающие минеральные удобрения и их компоненты, строительная индустрия и др.);

– органические соединения (пищевая, химическая промышленность, микробиологическая индустрия; предприятия, занимающиеся выпуском резинотехнических изделий, пластмасс и т. п.);

– органические соединения и минеральные компоненты (производства органического синтеза, нефтехимия, фармацевтика, нефтепереработка; пищевые производства (сахар, консервы и др.)).

Промышленные сточные воды по содержанию в них растворенных веществ, мг/л, подразделяются на четыре группы: 1 – $5 \cdot 10^2$; 2 – $5 \cdot 10^2 \dots 5 \cdot 10^3$; 3 – $5 \cdot 10^3 \dots 3 \cdot 10^4$; 4 – более $3 \cdot 10^4$. Они разделяются по физико-химическим свойствам и содержат в своем составе органические полупродукты, продукты (например, классифицируемые по температуре кипения, °C: $< 1,2 \cdot 10^2$; $1,2 \cdot 10^2 \dots 2,5 \cdot 10^2$; более $2,5 \cdot 10^2$ [1].

Производственные сточные воды классифицируются по степени агрессивности на две группы: слабоагрессивные (слабокислые ($\text{pH} = 6 \dots 6,5$) и слабощелочные ($\text{pH} = 8 \dots 9$)); сильноагрессивные (сильнокислые ($\text{pH} < 6$), сильнощелочные ($\text{pH} > 9$) и неагрессивные ($\text{pH} = 7$)).

Гальванические производства. Гальванотехника – часть промышленного комплекса (выделенная производственная линия), на различных стадиях которой проводятся операции нанесения защитных металлических покрытий в растворах электролитов при помощи электрохимических реакций (хромирование, золочение, лужение, меднение, цинкование и др.) [2].

Необходимыми технологическими операциями в процессе гальванической обработки деталей являются обезжиривание, травление, электрохимическое нанесение защитного покрытия, между которыми осуществляются процессы периодической промывки, например, умягченной или обессоленной водой. Подобные сточные воды содержат в своем составе ионы тяжелых металлов (хром, никель, цинк, железо и др.) и органические вещества. Выделенные линии гальванических производств обрабатывают полученные подобным образом сточные воды на своей территории (локальные очистные сооружения и схемы очистки) и сбрасывают их в канализацию. Компонентный состав сточных вод выделенных гальванических линий и их объем зависят, прежде всего, от непосредственной операции нанесения защитного покрытия (меднения, цинкования, хромирования и др.), износа производственного оборудования и степени рецикла промывной воды [2].

Следующими источниками сточных вод выделенных гальванических линий являются кислые и щелочные растворы ионообменного фильтра при обработке технологического раствора и проведении рецикла промывной воды. Поступление отработанных технологических растворов, содержащих ионы тяжелых металлов, в заводскую канализацию в виде залпового сброса приводит к сбоям отдельных элементов систем очистки сточных вод.

Сточные воды гальванических линий, образующиеся на территории предприятия, делятся на следующие виды [2 – 5]:

- сточные воды окончательной очистки, например, после фильтров для промывных вод;
- технологические растворы после ионообменных фильтров;
- фильтрат при обезвоживании полученного шлама или повторном использовании ценных компонентов.

Компонентный состав производственных сточных вод линии гальванического производства, например, АО «ТАГАТ» имени С. И. Лившица за 2018 год представлен в табл. 1 [6].

Производство минеральных удобрений. На производствах по выпуску минеральных удобрений в результате технологических операций жидкая фаза обогащается ионами, поэтому подобные растворы необходимо разделять и утилизировать по малоотходной и безотходной схемам [7].

Таблица 1

Компонентный состав сточных вод АО «ТАГАТ» имени С. И. Лившица за 2018 год

Период отбора проб	Концентрация, мг/дм ³								
	NH ₄ ⁺	Fe _{общ}	Zn ²⁺	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Ni ²⁺	Cu ²⁺	Cr ⁶⁺	Cr ³⁺
Январь	5,2	1,09	0,963	0,098	48,4	0,01	0,0084	0,01	
Февраль	1,36	0,155	0,52	0,069	49,5		0,01		
Март	1,07	0,119	0,54	0,245	65,0		0,0117		
Апрель	1,13	0,47	0,51	1,25	67,2		0,032		
Май	1,44	0,89	0,44	1,37	59,0	0,209	0,01		
Июнь	1,063	1,77	0,144	0,835	32,6	0,022			
Июль	1,05	1,77	0,138	0,930	47,0	0,034			
Август	1,060	0,60	0,235	0,473	40,5	0,107	0,0146		
Сентябрь	1,020	0,521	0,217	0,388	39,6	0,104	0,0160		
Октябрь	1,01	0,581	0,207	0,406	40,8	0,100	0,0140		
Ноябрь	0,43	0,098	0,073	0,461	60,7	0,023	0,01		
Декабрь	0,465	0,11	0,093	0,43	61,0	0,0195			
Среднее за год	1,358	0,0681	0,34	0,58	50,9	0,0549	0,0131	0,01	

В связи с изменениями Водного кодекса РФ (статья 44) многие промышленные предприятия страны столкнулись с угрозой закрытия.

Согласно статье 44, предприятия, имеющие сброс сточных и дренажных вод в санитарно-защитную зону городского водозабора, обязаны полностью прекратить сброс сточных вод с загрязняющими веществами (**ЗВ**) либо обеспечить уровень ЗВ, соответствующий предельно-допустимым концентрациям в водных объектах рыбохозяйственного назначения ПДК_{р.х.}) [8]. В подобной ситуации оказались и промышленные предприятия России по производству минеральных удобрений.

Специалистами ЗАО «Баромембранная технология» (ЗАО «БМТ») и ООО «Завод минеральных удобрений Кирово-Чепецкого химического комбината» отобраны пробы основных составных частей общего потока сточных вод и речной воды, и в условиях ЗАО «БМТ» проведен их анализ, результаты которого представлены в табл. 2 [9].

Аналогичная проблема образования технологических растворов и сточных вод с содержанием подобных компонентов присуща и производству ОАО «Минудобрения». Химический состав азотсодержащих сточных вод производства минеральных удобрений ОАО «Минудобрения», г. Россошь, представлен в табл. 3 [10].

С учетом возможностей существующей системы водоотведения и водопотребления предприятий по производству минеральных удобрений определены три основные группы сточных вод [7, 9, 11 – 13]:

- 1) ливневые стоки (лоток), сточные воды шламонакопителя (потоки III, IV, V);
- 2) азотсодержащие стоки (потоки I, II), которые могут быть выделены из общего потока;
- 3) включающая периодически образующиеся сточные воды производства аммиака, содержащие тяжелые металлы.

Таблица 2

Результаты анализа химического состава сточных и подпиточной вод

Показатель	ПЛК			Шламо-накопитель			ХГС	р. Вятка
	I	II	лоток	III	IV	V	VI	
pH, ед.	9,8	7,5	8,3	11,1	8,3	8,0	12,9	7,4
Жесткость, мг-экв/л	0,03	19,0	–	0,7	2,6	1,2	–	5,6
Щелочность, мг-экв/л	18,5	6,0		2,0	5,4	5,2	520	6,4
NH ₃ , мг/л	410	222	4,6	0,12	24	49	5500	1860
Ион, мг/л:								
NO ₃ [–]	22	513	22	120	0	0	100	30
NO ₂ [–]	9,6	0,7	3,5	0,5	0,3	0,6	3,5	3,1
SO ₄ ^{2–}	3	46	–	34	–	–	20	1200
PO ₄ ^{3–}	–	–		–			–	110
Cl [–]	–	–	–	–	–	–	324,3	–
АПАВ, мг/л	–	–	–	–	–	–	4,2	16
НПАВ, мг/л		0,02					5,3	1,6
Нефтепродукты, мг/л		41					12,5	0,73
ХПК, мгО ₂ /л		–					88	88
Fe _{общ} , мг/л	0,3	0,12	1,33	–	88	48	1720	–
Ион, мг/л:								
Mn ²⁺	–	1,25	–	–	0	0	0	–
Cu ²⁺		–			0	0,1	1,5	
Ni ²⁺		–			0,10	0,04	0,16	
Cr ⁶⁺		0			0,04	0	62	
Zn ²⁺	–	–	–	–	0	0	0,22	–
Цветность, мг/л	45	11	75	14	108	47	3800	104
Мутность, мг/л	2,3	0,4	14,4	3,4	22	14,8	–	19,8
Взвешенные, мг/л	–		21	–				–
Сухой остаток, мг/л	490	2248	260	1173	230	250	7674	7914

Примечание: АПАВ, НПАВ – соответственно анионные и неионогенные поверхностно-активные вещества; ХПК – химическая потребность в кислороде; ПЛК – промышленно-ливневая канализация; ХГС – периодически образующиеся сточные воды производства аммиака, содержащие в своем составе тяжелые металлы (соединения хрома, меди и др.)

Обработка и очистка сточных вод и технологических растворов гальванических производств и минеральных удобрений на разных стадиях производства продиктована не только нормативами надзорных органов РФ, но и необходимостью сбережения ценных компонентов, растворенных в подобных потоках технологических жидкостей, а также вторичным использованием очищенной (технической) воды [14].

Экспериментальные исследования электрохимических характеристик мембранных систем, оснащенных прианодной ОФАМ-К и прикатодной ОПМН-П мембранами, при разделении исследуемых растворов описаны в работе [15].

Экспериментальные зависимости удельного выходного потока от плотности тока при варьировании трансмембранного давления при разделении исследуемых растворов для мембран ОФАМ-К и ОПМН-П представлены на рис. 1 – 4, где сплошной линией показаны экспериментальные значения, штриховой – расчетные.

Таблица 3

Химический состав азотсодержащих сточных вод производства минеральных удобрений ОАО «Минудобрения», г. Россось

Компонент	Концентрация, мг/л
NH_4^+	50...200
NO_3^-	20...120
PO_4^{3-}	0,2...2,0
Cl^-	1,7...7,5
SO_4^{2-}	3,1...11,8
NO_2^-	0,24...13,1
$\text{Fe}_{\text{общ}}$	0,01...0,25
Cu^{2+}	0,04
pH	6,5...8,5

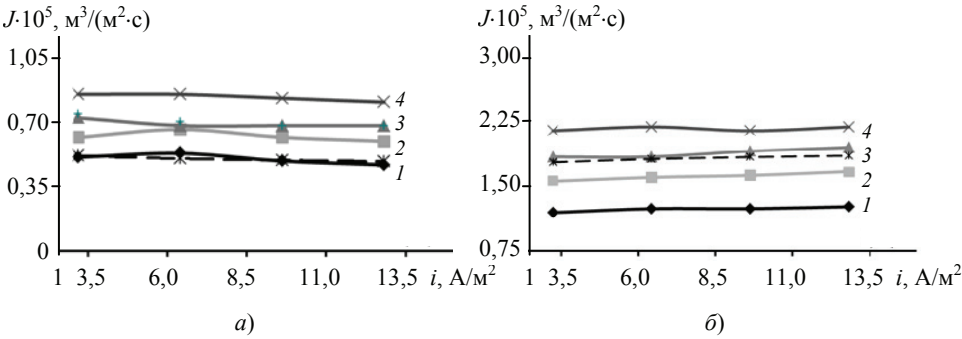


Рис. 1. Зависимости удельного выходного потока для прианодной ОФАМ-К (а), прикатодной ОПМН-П (б) мембран при разделении водного раствора нитрата аммония ($c = 0,2 \text{ кг/м}^3$) от плотности тока с варьированием трансмембранного давления P , МПа:
 $1 - 1,0; 2 - 1,2; 3 - 1,4; 4 - 1,7$

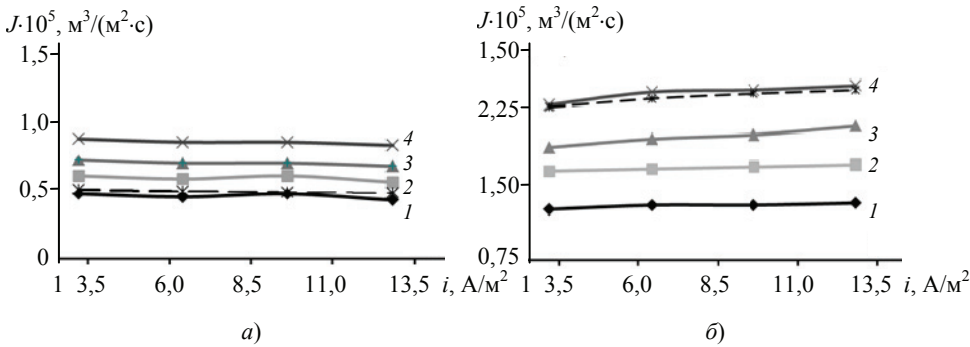


Рис. 2. Зависимости удельного выходного потока для прианодной ОФАМ-К (а), прикатодной ОПМН-П (б) мембран при разделении водного раствора нитрата аммония ($c = 0,8 \text{ кг/м}^3$) от плотности тока с варьированием трансмембранного давления P , МПа:
 $1 - 1,0; 2 - 1,2; 3 - 1,4; 4 - 1,7$

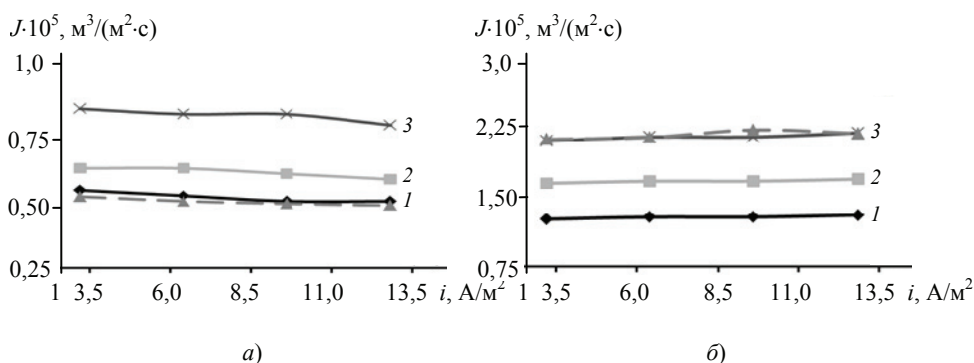


Рис. 3. Зависимости удельного выходного потока для прианодной ОФАМ-К (а), прикатодной ОПМН-П (б) мембран при разделении водного раствора, содержащего нитрат аммония ($c = 0,2 \text{ кг/м}^3$) и сульфат калия ($c = 0,04 \text{ кг/м}^3$) от плотности тока с варьированием трансмембранного давления P , МПа: 1 – 1,0; 2 – 1,2; 3 – 1,7

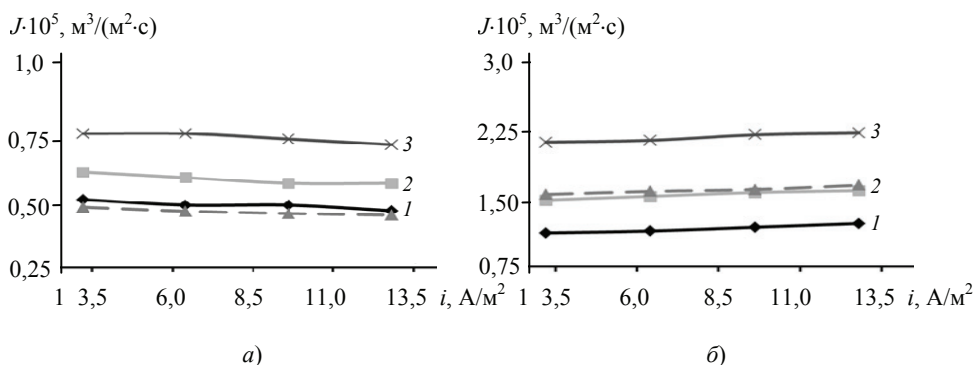


Рис. 4. Зависимости удельного выходного потока для прианодной ОФАМ-К (а), прикатодной ОПМН-П (б) мембран при разделении водного раствора, содержащего нитрат аммония ($c = 0,8 \text{ кг/м}^3$) и сульфат калия ($c = 0,04 \text{ кг/м}^3$) от плотности тока с варьированием трансмембранного давления P , МПа: 1 – 1,0; 2 – 1,2; 3 – 1,7

Экспериментальные и расчетные данные по удельному выходному потоку мембранной системы, оснащенной прианодной ОФАМ-К и прикатодной ОПМН-П мембранами, даны в табл. 4.

Проводя анализ зависимостей удельного выходного потока мембранной системы (см. рис. 1 – 4) при разделении водных и технологического растворов (нитрата аммония, нитрата аммония и сульфата калия), отмечается, что с ростом трансмембранного давления увеличивается удельный выходной поток. Это связано с возрастанием одной из движущих сил процесса баромембранного и электробаромембранного разделений исследуемых растворов.

Для прианодной мембраны ОФАМ-К с ростом плотности тока происходит уменьшение удельного выходного потока, что связано с изменением величины рН прианодного пермеата (его смещение в кислую среду), а для ОПМН-П – его увеличение (изменение величины рН прикатодного пермеата, смещение в щелочную среду) и влияние электроосмотического потока на процесс разделения исследуемых растворов.

Таблица 4

Экспериментальные и расчетные данные по удельному выходному потоку мембранной системы, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, оснащенной ОФАМ-К и ОПМН-П мембранами

Раствор	P , МПа	ОФАМ-К		ОПМН-П	
		$J \cdot 10^5$	$J_{\text{расч}} \cdot 10^5$	$J \cdot 10^5$	$J_{\text{расч}} \cdot 10^5$
Промышленный раствор производства нитрата аммония	1,0	0,4274	–	1,1111	–
	1,2	0,5342		1,4957	
	1,6	0,7479	0,7479	1,8803	1,8803
	2,0	0,8761	–	2,1795	–

В таблице 5 представлены экспериментальные и расчетные данные по коэффициенту задержания мембран ОФАМ-К и ОПМН-П процесса баромембранного разделения технологического раствора производства нитрата аммония при постоянном трансмембранном давлении $P = 1,6$ МПа с концентрациями ионов NH_4^+ и NO_3^- , мг/дм^3 , соответственно 1,358 и 0,58.

На рисунке 5 показана модернизированная технологическая схема с электробаромембранным и баромембранным разделением растворов гальванических производств.

Кислотно-щелочные стоки, содержащие исследуемые ионы, поступают в усреднительную емкость 1 (для усреднения концентрации растворенных компонентов и выравнивания pH, первый блок), которая разделена на два блока. Затем обрабатываемые сточные воды, переливающиеся через разделительную перегородку, поступают во второй блок усреднительной емкости 1. В зависимости от того, какой водородный показатель pH и усредненные концентрации растворенных компонентов в сточных водах имеются, при помощи дозаторов (щелочи 2, кислоты 3 и флокулянта 4) во второй блок усреднительной емкости 1 подобные компоненты добавляются последовательно. Далее сточные воды, прошедшие обработку, при помощи насоса перекачиваются на фильтр-пресс 5, где раствор отфильтровывается, поступает после предварительного фильтра 6 в промежуточные емкости 7 и при помощи насоса высокого давления подается в электронанофильтрационную установку 8. Шлам в фильтр-прессе 5 промывается и направляется на вторичное использование (строительство дорог, изготовление строительных изделий). Промывная жидкость из фильтр-пресса 5 после промывки шлама также поступает в промежуточную емкость 7.

При достижении необходимого среднего уровня в емкости 7 включается установка электронанофильтрации 8, на которой проводится процесс электробаромембранного разделения. Установка электронанофильтрации 8 имеет один контур

Таблица 5

Экспериментальные и расчетные данные по коэффициенту задержания мембран ОФАМ-К и ОПМН-П процесса баромембранного разделения технологического раствора производства нитрата аммония

Мембрана	P , МПа	Ион	K	$K_{\text{расч}}$
ОФАМ-К	1,6	NH_4^+	0,8402	0,8402
		NO_3^-	0,6897	0,6897
ОПМН-П		NH_4^+	0,6348	0,6348
		NO_3^-	0,2690	0,2690

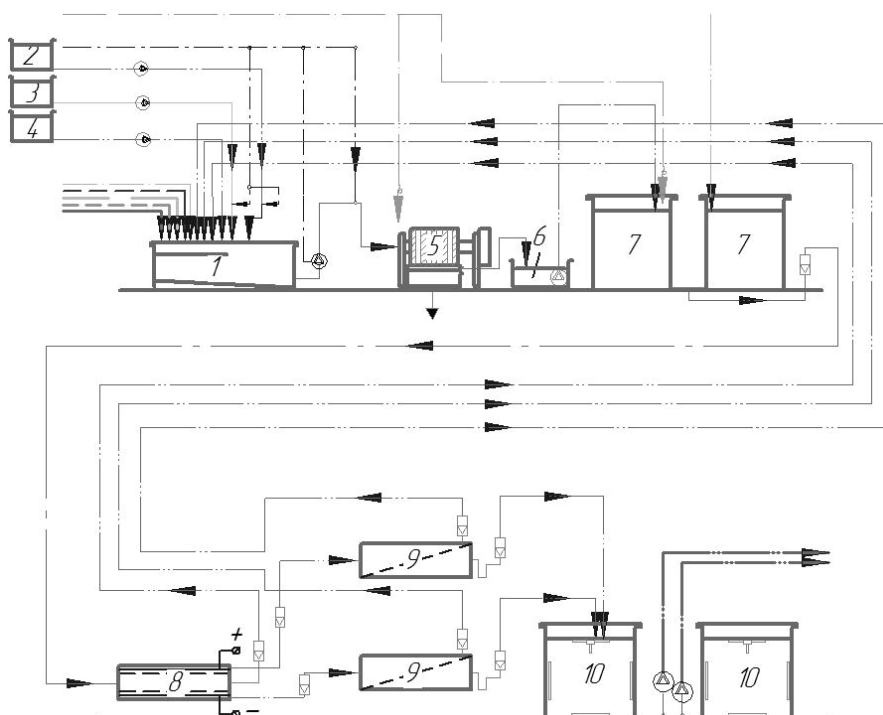


Рис. 5. Модернизированная технологическая схема очистки с электробаромембранным и баромембранным разделениями растворов гальванических производств:

1 – усреднительная емкость; 2, 3, 4 – дозаторы щелочи, кислоты и флокулянта соответственно; 5 – пресс-фильтр; 6 – предварительный фильтр; 7 – промежуточная емкость; 8, 9 – установки электронанофильтрации и нанофильтрации соответственно; 10 – накопительная емкость пермеата

обработки, который снабжен своим повышающим насосом. Ретентат после электробаромембранного разделения возвращается в емкость 1 для повторной очистки. Емкости 7 соединены между собой как сообщающиеся сосуды. При отсутствии нижнего уровня в емкости 7 или наличии верхнего уровня в емкостях 10, установка электронанофильтрации 8 отключается.

При достижении среднего уровня в емкости 7 включается установка нанофильтрации 9, которая имеет два независимых контура обработки технологического раствора гальванического производства после установки электронанофильтрации 8. Каждый контур обработки раствора гальванического производства снабжен своим повышающим насосом. Один нанофильтрационный контур обрабатывает прианодный пермеат, а второй – прикатодный (при условии того, что известен оптимальный диапазон значения величины pH ($2 \leq \text{pH} \leq 12$) прикатодного и прианодного пермеатов, подаваемых на нанофильтрационный аппарат 9 на основе экспериментальных данных).

Пермеат двух контуров установки нанофильтрации 9 поступает в накопительные емкости 10. Работа насосов блокируется при наличии верхнего уровня в емкостях 10, а также при отсутствии нижнего уровня в емкости 7. Ретентат установки нанофильтрации 9 обоих контуров поступает на рецикл в емкость 1, а пермеат – в накопительные емкости 10. Работа насоса блокируется при наличии верхнего уровня в емкости 10, а также при отсутствии нижнего уровня в емкости 1.

На рисунке 6 представлена модернизированная технологическая схема производства нитрата аммония (аммиачной селитры).

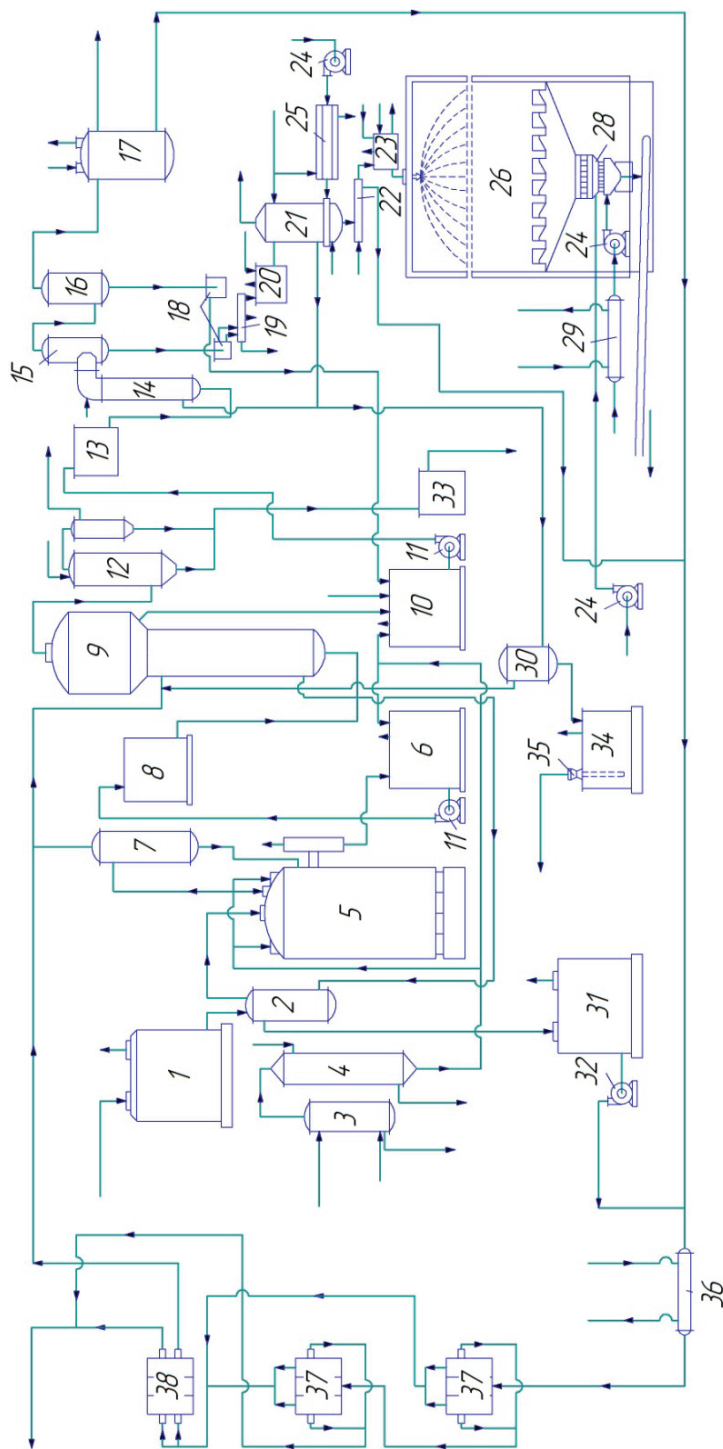


Рис. 6. Модернизированная технологическая схема производства нитрата аммония:

1 – напорный бак азотной кислоты; 2, 4 – подогреватели азотной кислоты и аммиака соответственно; 3 – отделитель-испаритель жидкого аммиака; 5 – нейтрализатор ИТН; 6, 10 – сборники для раствора аммиачной селитры; 7 – сепаратор; 8, 13 – напорные баки для раствора аммиачной селитры; 9, 14, 21 – выпарные аппараты соответственно I, II и III ступеней; 11 – центробежные насосы; 12 – барометрический конденсатор смеси; 15, 16 – сепараторы к выпарке II ступени; 17 – поверхностный конденсатор; 18 – гидравлический затвор; 19, 22 – желоба; 20, 23 – напорные баки для плава; 24 – вентилятор для воздуха; 25 – подогреватель воздуха; 26 – грануляционная башня; 27 – гранулятор; 28 – охлаждающий аппарат с двумя кипящими слоями; 29 – холодильник воздуха; 30, 36 – расширитель и охладитель конденсата соответственно; 31 – сборник конденсата сокового пара; 32, 35 – центробежный и погружной насосы соответственно; 33 – барометрический аппарат; 34 – барометрический аппарат; 37 – барометрический аппарат; 38 – электролизатор

Модернизация технологической схемы производства нитрата аммония проведена на стадии обработки конденсата сокового пара. Получаемый конденсат сокового пара после частичной нейтрализации поступает в охладитель конденсата 36, где охлаждается водой до необходимой температуры применения той или иной пористой мембраны. Далее охлажденный конденсат сокового пара направляется в первый баромембранный (наночислтрационный) аппарат 37, где происходит его разделение на пермеат и ретентат.

Пермеат после первой стадии разделения, образованный в баромембранном (наночислтрационном) аппарате 37, поступает во второй баромембранный (наночислтрационный) аппарат 37, где происходит аналогичное разделение. Пермеат после второго баромембранного аппарата 37 используется в виде очищенной технической воды, обедненной растворенными компонентами и возвращаемой на стадии производства нитрата аммония.

Ретентат после первого и второго баромембранных аппаратов 37 направляется в электродисализатор 38 [16], в котором происходит разделение раствора, при этом концентрат возвращается в сепаратор 7 и выпарной аппарат I ступени 9 на повторное использование в процессе производства нитрата аммония. Дилуат поступает для дальнейшего использования в виде очищенной технической воды и также возвращается на стадии производства.

Заключение

1. Экспериментально исследованы кинетические характеристики при варьировании трансмембранного давления, плотности тока в процессе разделения водных и технологических растворов гальванических линий и производств минеральных удобрений, содержащих ионы NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} и другие, при использовании наночислтрационных мембран вида ОФАМ-К и ОПМН-П.

2. Модернизированы технологические схемы разделения промышленных растворов и сточных вод процесса цинкования и производства нитрата аммония с применением баромембранных и электробаромембранных технологий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №19-38-90117).

Список литературы

1. Очистка производственных сточных вод / С. В. Яковлев, Я. А. Карелин, Ю. М. Ласков, Ю. В. Воронов. – М. : Стройиздат, 1985. – 336 с.
2. Очистка промышленных сточных вод : справочное издание : пер. с нем. / Под ред. Ф. В. Кармазина. – СПб. : Новый журнал, 2012. – 384 с.
3. Очистка сточных вод гальванического цеха (на примере ООО ЭПО «Сигнал» г. Энгельс) / В. С. Чиркова, Н. А. Собгайда, И. Н. Алферов, Ф. О. Рзазаде // Вестн. Оренбургского гос. ун-та. – 2015. – № 10 (185). – С. 460 – 463.
4. Очистка сточных вод гальванических цехов предприятий республики Беларусь / В. Н. Марцуль, О. С. Залыгина, А. В. Лихачева, В. И. Романовский // Труды БГТУ. – 2013. – № 3. – С. 61 – 66.
5. Прожорина, Т. И. Возможность усовершенствования очистки сточных вод гальванического производства / Т. И. Прожорина, О. С. Бурлакова // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Серия: География. Геоэкология. – 2006. – № 1. – С. 67 – 70.
6. Чуксин А. В. Методы анализа концентрации растворенных веществ в технологических растворах / А. В. Чуксин // Раздел Годового отчета АО «ТАГАТ» имени С. И. Лившица. – Тамбов, 2018. – 23 с.

7. Перспективы применения сточных вод ОАО «Минудобрения» / С. И. Нифталиев, И. В. Кузнецова, Ю. С. Перегудов [и др.] // Экология и промышленность России. – 2012. – № 5. – С. 36 – 39.
8. Водный кодекс РФ : Федер. закон от 03.06.2006 г. № 74-ФЗ. – Текст : электронный // Гарант : офиц. сайт. – URL : <https://base.garant.ru/12147594/> (дата обращения: 23.04.2020).
9. Комплексная переработка сточных вод производства минеральных удобрений / А. А. Поворов, Л. В. Ерохина, В. Ф. Павлова [и др.] // Ионный перенос в органических и неорганических мембранах. Электромембранные технологии на базе фундаментальных исследований явлений переноса : материалы Российских конф. с Междунар. участием, 19 – 25 мая 2008 г., Туапсе. – Краснодар, 2008. – С. 195 – 198.
10. Электродиализ в очистке азотсодержащих сточных вод предприятия по производству минеральных удобрений / С. И. Нифталиев, О. А. Козадрова, К. Б. Ким, Ю. М. Малявина // Хим. промышленность сегодня. – 2014. – № 7. – С. 52 – 56.
11. Модифицирование и применение нитросодержащих сточных вод производства минерального удобрения / С. И. Нифталиев, И. В. Кузнецова, О. А. Козадрова [и др.] // Экология и промышленность России. – 2012. – № 7. – С. 28 – 31.
12. Зинюков, Ю. М. Структурно-иерархическая модель природно-технической экосистемы «ОАО «Минудобрения» – природная среда» / Ю. М. Зинюков // Вестн. Воронежского ун-та. Серия: Геология. – 2001. – № 12. – С. 190 – 197.
13. Комплексная электродиализная технология переработки конденсата сокового пара производства аммиачной селитры / В. И. Заболоцкий, В. Ф. Письменский, С. И. Етеревскова [и др.] // Ионный перенос в органических и неорганических мембранах. Электромембранные технологии на базе фундаментальных исследований явлений переноса : материалы Российских конф. с Междунар. участием, 19 – 25 мая 2008 г., Туапсе. – Краснодар, 2008. – С. 109 – 111.
14. Сравнительное исследование методов разделения технологических растворов и сточных вод гальванических производств / О. А. Ковалева, С. И. Лазарев, Д. Н. Коновалов, С. В. Ковалев // Вестн. технологического ун-та. – 2018. – Т. 21, № 5. – С. 58 – 63.
15. Вольт-амперные и омические характеристики электромембранной очистки гальванических стоков от ионов NH_4^+ , Zn^{2+} , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} / Д. Н. Коновалов, С. В. Ковалев, С. И. Лазарев [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2019. – Т. 25, № 4. – С. 612 – 621. doi: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.612-621
16. Ким, К. Б. Электродиализ аммоний- и нитратсодержащих водных растворов : дис. ... канд. техн. наук : 02.00.05 / Ким Ксения Борисовна. – Воронеж, 2016. – 140 с.

Experimental Studies of the Kinetic Characteristics of Nano-Filtration Membranes in Separation of Industrial Solutions of the Zinc Processing and Production of Ammonium Nitrate

D. N. Kononov, S. I. Lazarev, S. V. Kovalev, P. Lua,
E. I. Gorelova, O. A. Kovaleva, M. I. Mikhailin, A. A. Levin

*Department of Mechanics and Engineering Graphics, geometry@mail.nnn.tstu.ru;
TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: membrane; separation; solution; transmembrane pressure; specific output stream.

Abstract: The analysis of technological and industrial solutions, wastewater of galvanic lines and production of ammonium nitrate is presented. It was noted that the component composition of ions in technological solutions and wastewater can vary in production at a predetermined interval throughout the year. Studies on the electron-filtration separation of technological solutions of the galvanizing process and the production of ammonium nitrate have shown that the specific output stream for the cathode and anode membranes, the retention coefficient depend on the direct current density applied to the electro-membrane system, and the transmembrane pressure. Based on the experiments performed and the data obtained on this with respect to the retention coefficient, specific output stream through the nanofiltration membranes under study, modernized technological schemes for the separation of technological solutions and wastewater (applying protective coatings and production of ammonium nitrate) using baromembrane and electro-membrane technologies are proposed.

References

1. Yakovlev S.V., Karelin Ya.A., Laskov Yu.M., Voronov Yu.V. *Ochistka proizvodstvennykh stochnykh vod* [Treatment of industrial wastewater], Moscow: Stroyizdat, 1985, 336 p. (In Russ.)
2. Karmazinov F. V. [Ed.] *Ochistka promyshlennykh stochnykh vod: spravochnoye izdaniye* [Industrial wastewater treatment: reference edition], St. Petersburg: Novyy zhurnal, 2012, 384 p. (In Russ.)
3. Chirkova V.S., Sobgayda N.A., Alferov I.N., Rzazade F.O. [Wastewater treatment of the galvanic plant (for example, OOO EPO "Signal" Engels)], *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Orenburg State University], 2015, no. 10 (185), pp. 460 – 463. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Martsul' V.N., Zalygina O.S., Likhacheva A.V., Romanovskiy V.I. [Wastewater treatment of galvanic shops of enterprises of the Republic of Belarus], *Trudy BGTU* [Trudy BSTU], 2013, no. 3, pp. 61-66. (In Russ.)
5. Prozhorina T.I., Burlakova O.S. [The possibility of improving wastewater treatment of galvanic production], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya* [Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology], 2006, no. 1, pp. 67-70. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Chuksin A.V. [Methods of analysis of the concentration of dissolved substances in technological solutions], Section of TAGAT imeni S. I. Livshitsa, Tambov, 2018, 23 p. (In Russ.)
7. Niftaliyev S.I., Kuznetsova I.V., Peregudov Yu.S., Okshin V.V., Mel'nik A.V. [Prospects for the use of wastewater from OJSC Mineral Fertilizers], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2012, no. 5, pp. 36-39. (In Russ.)
8. <https://base.garant.ru/12147594/> (accessed 23 April 2020).
9. Povorov A.A., Yerokhina L.V., Pavlova V.F. [et al.] *Ionnyy perenos v organicheskikh i neorganicheskikh membranakh. Elektromembrannyye tekhnologii na baze fundamental'nykh issledovaniy yavleniy perenosa* [Ion transport in organic and inorganic membranes. Electro-membrane technologies based on fundamental research on transport phenomena], Proceedings of the Russian Conferences with International Participation, 19 - 25 May, 2008, Tuapse, Krasnodar, 2008, pp. 195-198. (In Russ.)
10. Niftaliyev S.I., Kozaderova O.A., Kim K.B., Malyavina Yu.M. [Electrodialysis in the treatment of nitrogen-containing wastewater of the enterprise for the production

of mineral fertilizers], *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya* [Chemical industry today], 2014, no. 7, pp. 52-56. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Niftaliyev S.I., Kuznetsova I.V., Kozaderova O.A., Okshin V.V., Klovov G.V., Mel'nik A.V. [Modification and use of nitrous-containing wastewater from the production of mineral fertilizers], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2012, no. 7, pp. 28-31. (In Russ.)

12. Zinyukov Yu.M. [Structural and hierarchical model of the natural and technical ecosystem "Mineral Fertilizers OJSC - environment"], *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Seriya: Geologiya* [Bulletin of the University of Voronezh. Series: Geology], 2001, no. 12, pp. 190-197. (In Russ.)

13. Zabolotskiy V.I., Pis'menskiy V.F., Yeterevskova S.I. [et al.] *Ionnyy perenos v organicheskikh i neorganicheskikh membranakh. Elektromembrannyye tekhnologii na baze fundamental'nykh issledovaniy yavleniy perenosa* [Ion transport in organic and inorganic membranes. Electro-membrane technologies based on fundamental research on transport phenomena], Proceedings of the Russian Conferences with International Participation, 19 - 25 May, 2008, Tuapse, Krasnodar, 2008, pp. 109-111. (In Russ.)

14. Kovaleva O.A., Lazarev S.I., Konovalov D.N., Kovalev S.V. [A comparative study of methods for the separation of technological solutions and wastewater from galvanic industries], *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2018, vol. 21, no. 5, pp. 58-63. (In Russ., abstract in Eng.)

15. Konovalov D.N., Kovalev S.V., Lazarev S.I., Lua P., Bernatskiy P.N., Prokhorenkov V.D. [Current-voltage and ohmic characteristics of the electro-membrane treatment of galvanic effluents from ions NH_4^+ , Zn^{2+} , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-}], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 4, pp. 612-621, doi: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.612-621 (In Russ., abstract in Eng.)

16. Kim K.B. *PhD Dissertation (Technical)*, Voronezh, 2016, 140 p. (In Russ.).

Experimentelle Studien der kinetischen Eigenschaften der Nanofiltrationsmembranen bei der Trennung der industriellen Verzinkungslösungen und Herstellung von Ammoniumnitrat

Zusammenfassung: Es ist die Analyse von technologischen und industriellen Lösungen, Abwasser von galvanischen Leitungen und Produktion von Ammoniumnitrat vorgestellt. Es wird darauf hingewiesen, dass die Komponentenzusammensetzung von Ionen in technologischen Lösungen und Abwasser in der Produktion in einem bestimmten Intervall während des Jahres variieren kann. Studien zur Elektronenfiltrationstrennung technologischer Lösungen des Verzinkungsprozesses und zur Herstellung von Ammoniumnitrat haben gezeigt, dass der spezifische Ausgangsstrom für die Kathoden- und Anodenmembranen, der Retentionskoeffizient von der an das Elektromembransystem angelegten Gleichstromdichte und dem Transmembrandruck abhängen. Auf der Grundlage der durchgeführten Experimente und der dazu erhaltenen Daten bezüglich des Retentionskoeffizienten und des spezifischen Ausgangsstroms durch die untersuchten Nanofiltrationsmembranen sind modernisierte technologische Schemata zur Trennung von technologischen Lösungen und Abwasser (Aufbringen von Schutzbeschichtungen und Herstellung von Ammoniumnitrat) unter Verwendung von Baromembran- und Elektromembrantechnologien vorgeschlagen.

Études expérimentales sur les caractéristiques cinétiques des membranes de filtration lors de la séparation des solutions industrielles du processus de la galvanisation et de la production de nitrate d'ammonium

Résumé: Est présentée une analyse des solutions technologiques et industriels, des eaux usées des lignes galvaniques et de la production de nitrate d'ammonium. Est noté que la composition des ions dans les solutions technologiques et les eaux usées peut varier au cours de la production dans un intervalle donné pendant une année. Les études sur la division électronanofractionnelle des solutions technologiques du processus de la galvanisation et de la production de nitrate d'ammonium ont montré que la masse volumique d'un flux de sortie pour les membrane cathodiques et anodiques, le coefficient de la détention dépend de la densité du courant électrique appliqué, de la pression transmembranaire. A la base des expériences sont proposés des schémas technologiques de la séparation des solutions technologiques et des eaux usées.

Авторы: *Коновалов Дмитрий Николаевич* – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»; *Лазарев Сергей Иванович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика и инженерная графика»; *Ковалев Сергей Владимирович* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Механика и инженерная графика»; *Луа Пене* – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»; *Горелова Елена Игоревна* – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»; *Ковалева Ольга Александровна* – доктор технических наук, доцент кафедры «Механика и инженерная графика»; *Михайлин Максим Игоревич* – магистрант; *Левин Александр Александрович* – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Абоносимов Олег Аркадьевич* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОМПОНЕНТОВ МОДИФИЦИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ В ПРОЦЕССЕ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНО-БИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО

**В. А. Фролов, П. С. Беляев, П. В. Макеев,
В. П. Беляев, И. В. Шашков**

*Кафедра «Материалы и технология», polymers@asp.tstu.ru;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: модификация битума; поверхностно-активные вещества; полимерно-битумное вяжущее; полиэтилен; смешение; термоэластопласт.

Аннотация: Для получения полимерно-битумных вяжущих (ПБВ) используют процессы смешения различных модификаторов с нефтяными битумами в целях придания вяжущему более высоких качественных показателей по сравнению с исходным материалом. Проблема поиска составов модификаторов, обеспечивающих полный спектр требуемых показателей дорожных вяжущих, остается актуальной. Рассмотрены особенности использования для модифицирования битумов смешанного типа модификаторов на основе термоэластопластов и термопластов. Исследованы отклики в виде изменений показателей качества вяжущего при смешении битумов с различными объемами термоэластопласта и термопласта, в присутствии или отсутствии поверхностно-активных веществ, а также их смесей различного состава. В результате проведенных исследований разработана математическая модель зависимости характеристик ПБВ от содержания вводимых в процессе смешения компонентов.

Развитие современного общества происходит в условиях постоянного увеличения грузовых автомобильных перевозок, растущих нагрузок на ось транспортных средств, интенсивности движения. Перевозки осуществляются в неблагоприятных климатических условиях, что приводит к преждевременному износу дорожных покрытий, уменьшению межремонтных циклов и увеличению затрат на строительство и эксплуатацию дорог. Исследования показывают, что при безусловном соблюдении технологии укладки дорожных покрытий их низкая долговечность определяется недостаточными качественными показателями используемого нефтяного битума. Поэтому битумы подвергают процессам модификации, причем в подавляющем большинстве случаев при этом используют полимерные материалы [1, 2]. Наиболее часто для модификации битумов используют термоэластопласты типа стирол–бутадиен–стирол (СБС) [3 – 5], которые характеризуются сравнительно высокой стоимостью. Полимерно-битумные вяжущие (ПБВ) на основе термоэластопластов имеют ряд недостатков, например, склонность к расслаиванию, низкую адгезию к минеральным материалам асфальтобетонной смеси, поэтому в состав ПБВ вводят специальные поверхностно-активные вещества (ПАВ) [1, 6]. С другой стороны, существует проблема утилизации отходов полимерной упаковки, которые гипотетически могут быть использованы для модификации битумов [7]. Однако многочисленные попытки применения для моди-

фикации битумов, например, полиолефинов, широко используемых для производства упаковки, не выявили возможности получения конкурентных преимуществ получаемых на их основе ПБВ [3, 8 – 10]. Поэтому необходимы дальнейшие исследования в направлении утилизации отходов полимерной тары и упаковки путем их использования для модификации битумов. В данной работе представлены результаты изменения характеристик нефтяного дорожного битума в процессах смешения с термоэластопластом, полиэтиленом низкой плотности, ПАВ и их различными сочетаниями.

Объекты исследования – нефтяной дорожный битум марки БНД 90/130, термоэластопласт ДСТ-30-01 производства ПАО «СИБУР Холдинг», полиэтилен низкой плотности, поверхностно-активные вещества Дорос-АП, АМДОР-9, АМДОР-10, Адгезол-5 и ПБВ на их основе.

Для проведения процесса совмещения битумов с полимерами разработана и изготовлена специальная лабораторная установка, имеющая в своем составе два лопастных смесителя объемами 3 и 5 литров [11]. Оба смесителя характеризуются полным геометрическим подобием и обеспечивают возможность исследования влияния масштабного перехода на процесс совмещения компонентов ПБВ. Смеситель имеет цилиндрический корпус с плоским приваренным днищем. Сверху корпус закрывается крышкой, на которой расположены патрубок для загрузки и подшипниковый узел вала перемешивающего устройства с сальниковым уплотнением, термopара для контроля температуры. На валу находятся смесительные органы: лопастные мешалки. Вращение перемешивающего устройства осуществляется посредством клиноременной передачи со сменными шкивами. Корпус смесителя снабжен системой электрического обогрева, с помощью которой устанавливается заданный температурный режим. Электродвигатель привода оснащен частотным преобразователем для бесступенчатого регулирования частоты вращения рабочих органов. Смесительные органы имеют противоположные углы наклона лопастей и создают встречные вертикальные потоки материала, а лопастные центробежные мешалки – радиальные потоки, что приводит к интенсивному турбулентному режиму смешения.

Совмещение компонентов проводили при различных значениях циркуляционного критерия Рейнольдса, температурах до 160 °С и времени процесса до 90 минут. Показатели ПБВ исследовали в соответствии с европейскими и российскими стандартами [11, 12].

Цель исследований – нахождение режимных параметров проведения процесса модификации битума и построение математических зависимостей, обеспечивающих прогнозирование свойств дорожного вяжущего, возможность постановки и решения задачи оптимизации в соответствии с выбранными критериями.

Мониторинг изменения характеристик нефтяного дорожного битума вначале проводили с каждым из компонентов в отдельности. Затем исследовали их совместное воздействие в направлении достижения качественных показателей, сравнимых с требованиями ГОСТ Р для ПБВ-60 [12], рекомендованного для использования в средней климатической зоне России.

В результате исследований установлено следующее. Процесс совмещения битума с модификаторами целесообразно проводить в турбулентном режиме при значении циркуляционного критерия Рейнольдса $Re_c > 1000$

$$Re_c = \frac{nd_m^2\rho}{\mu},$$

где n , d_m – частота вращения и диаметр мешалки соответственно; ρ – плотность смеси; μ – динамическая вязкость смеси при температуре 150...160 °С в течение 45...60 мин. При этом достигается достаточная равномерность распределения

полимеров в битуме с размером капель порядка $d_k \approx 9 \cdot 10^{-5} \dots 1,5 \cdot 10^{-4}$ м при скоростях вращения 800 и 450 об/мин для смесителей 3 и 5 литров соответственно.

С увеличением содержания термоэластопласта ДСТ 30-01 при его совмещении с нефтяным битумом БНД 90/130 наблюдается увеличение температуры размягчения, появление и рост важного показателя – эластичности, но при этом происходит резкое снижение глубины проникновения иглы, показатель которого имеет тенденцию к выходу за пределы требований ГОСТ Р 52056–2003 для ПБВ-60 (табл. 1). Для компенсации негативного влияния термоэластопласта на глубину проникновения иглы часто используют добавление в систему промышленных масел, однако это усугубляет проблему низкой адгезии получаемого ПБВ к минеральным материалам асфальтобетонной смеси, а также способствует процессам расслоения композиции.

С увеличением содержания полиэтилена низкой плотности при его совмещении с нефтяным битумом наблюдается меньшая интенсивность роста температуры размягчения по сравнению с модификацией термоэластопластом, менее выраженное снижение глубины проникновения иглы, а также недостаточный уровень эластичности (см. табл. 1). Это подтверждает полученные другими исследователями выводы о затруднениях в решении задачи по обеспечению перечня потребительских свойств дорожного вяжущего, получаемого в результате модификации битумов полиолефинами [3, 8, 9].

Проведены исследования влияния на показатели модифицированных битумов различных ПАВ, применяемых для повышения сцепления ПБВ на основе термоэластопластов с минеральными материалами асфальтобетонных смесей.

В результате установлено, что лучшие результаты получаются при использовании ПАВ АМДОР-10. Введение в битум БНД 90/130 вещества АМДОР-10 в количестве 0,1 – 0,5 масс.% при отсутствии термоэластопласта и полиэтилена не приводит к заметному изменению температуры размягчения и растяжимости, однако до 30 % снижает глубину проникновения иглы.

Исследована возможность частичного замещения термоэластопласта ДСТ-30-01 полиэтиленом в процессе модификации дорожных битумов в целях снижения себестоимости получаемого в результате ПБВ. Исследования показали, что в отсутствие ПАВ совместное использование термоэластопласта ДСТ-30-01 и полиэтилена не позволяет получить сопоставимые показатели модифицированного битума БНД 90/130 по сравнению с модификацией чистым термоэластопластом.

Таблица 1

**Физико-механические показатели ПБВ
при модификации термоэластопластом / термопластом**

Показатель	Содержание термоэластопласта или термопласта, масс.%				ГОСТ Р 52056–2003
	0	2	4	6	
Эластичность, %	0	$\frac{61}{9}$	$\frac{81}{10}$	$\frac{82}{10}$	80
Температура размягчения, °С	46	$\frac{55}{55}$	$\frac{75}{64}$	$\frac{89}{72}$	54
Растяжимость при 25 °С, мм	$\frac{763}{765}$	$\frac{695}{245}$	$\frac{690}{190}$	$\frac{470}{160}$	250
Глубина проникновения иглы при 25 °С, × 10 мм	114	$\frac{111}{65}$	$\frac{64}{54}$	$\frac{50}{34}$	60

Пр и м е ч а н и е : в числителе даны значения для термоэластопласта, в знаменателе – термопласта.

Только при совместном использовании всех трех агентов установлена принципиальная возможность снижения себестоимости получаемого ПБВ для достижения приемлемых показателей качества данного дорожного вяжущего. В таблице 2 представлены результаты комплексного воздействия трех агентов при модифицировании битума БНД 90/130 и содержании в ПБВ поверхностно-активного вещества АМДОР-10 в количестве 0,1 масс.%. Для построения математической модели зависимости характеристик ПБВ от состава использовали методы статистического планирования экспериментов. В результате установлена область изменения варьируемых параметров и получены математические зависимости характеристик ПБВ от содержания модифицирующих агентов. Перед планированием эксперимента проводилась оценка дисперсии воспроизводимости, для чего выполняли по три параллельных опыта в трех различных точках факторного пространства. Расчетные значения критериев Кохрена по выходным переменным: температуры размягчения Y_1 , эластичности Y_2 , глубины проникновения иглы Y_3 , растяжимости Y_4 равны соответственно 0,63; 0,5; 0,55 и 0,44.

Табличное значение критерия Кохрена для данного эксперимента $G_T = 0,871$. Поэтому результаты признаны воспроизводимыми.

В результате получены следующие математические зависимости:

$$Y_1 = 55,72 + 1,5X_1 + 5,14X_2 + 0,69X_1^2 - 0,69X_2^2 + 0,48X_1X_2 ; \tag{1}$$

$$Y_2 = -3,8 + 7,77X_1 + 54,3X_2 - 0,17X_1^2 - 8,91X_2^2 - 1,48X_1X_2 ; \tag{2}$$

$$Y_3 = 87,4 - 2,55X_1 - 10,9X_2 - 0,34X_1^2 + 0,51X_2^2 + 0,08X_1X_2 ; \tag{3}$$

$$Y_4 = -537,6 + 289,31X_1 + 576,44X_2 - 30,63X_1^2 - 73,37X_2^2 - 39X_1X_2 . \tag{4}$$

На рисунке 1 представлены поверхности функций $Y_1 - Y_4$ в зависимости от содержания термоэластопласта (ТЕР) и полиэтилена низкой плотности (РЕ). Полученные зависимости позволяют осуществлять постановку и решение задач оптимизации состава ПБВ. Например, для южных районов РФ в качестве критерия оптимальности может быть выбрана температура размягчения. В этом случае постановка задачи оптимизации выглядит следующим образом: при выбранных

Таблица 2

Физико-механические показатели ПБВ при комплексном использовании трех модифицирующих агентов

Показатель	Содержание термоэластопласта / термопласта, масс. %								
	1/1	2/1	3/1	1/2	2/2	3/2	1/3	2/3	3/3
Эластичность, %	48	75	83	54	78	85	60	83	88
Температура размягчения, °С	63	66	68	67	71	74	73	77	81
Растяжимость при 25 °С, мм	189	508	680	339	625	751	442	676	768
Глубина проникновения иглы при 25 °С, × 10, мм	73	65	57	70	62	53	67	58	50

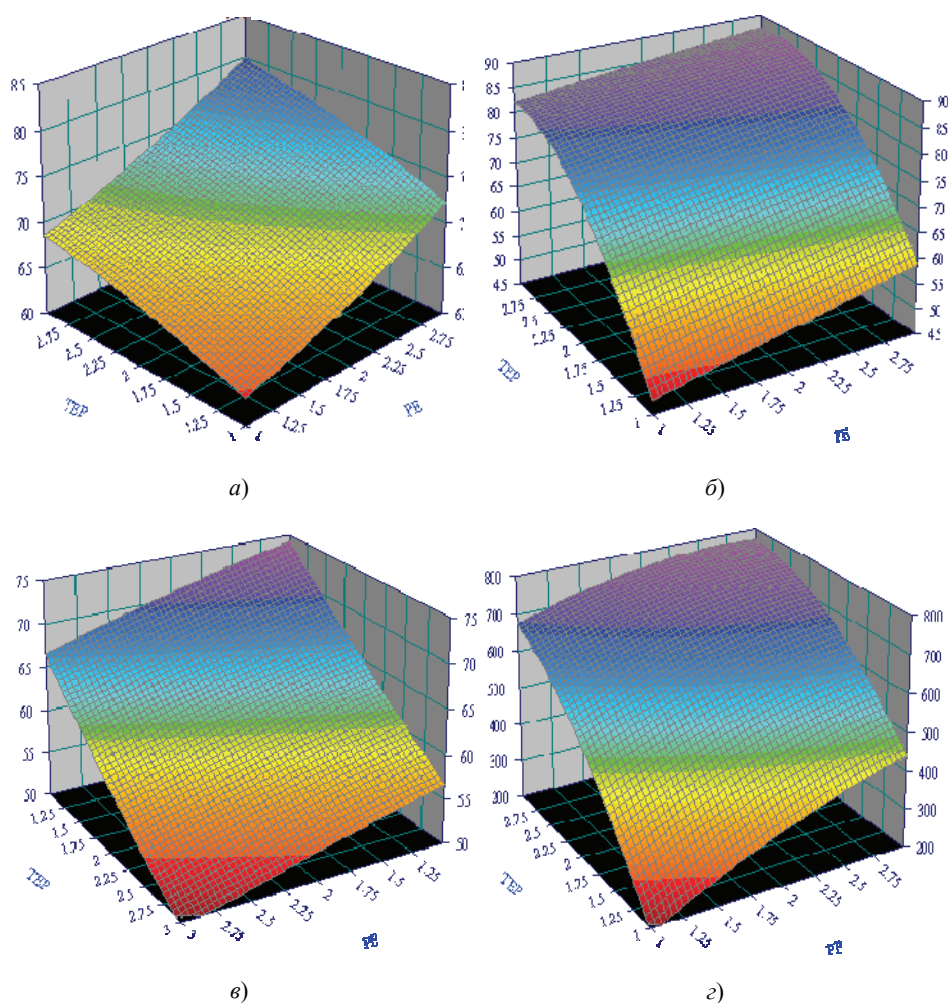


Рис. 1. Поверхность целевых функций:

a – температура размягчения, °C; b – эластичность, %;
 v – глубина проникновения иглы, $\times 10$ мм; z – растяжимость, мм

компонентах модифицирующих добавок и допустимых диапазонах изменения их содержания в дорожном вяжущем необходимо подобрать состав ПБВ, доставляющий максимум функции Y_1 при заданных ограничениях на значения функций Y_2, Y_3, Y_4 и связей в виде зависимостей (1) – (4).

Таким образом, совместное использование термоэластопласта ДСТ-30-01, полиэтилена низкой плотности и поверхностно-активного вещества АМДОР-10 в качестве компонентов модифицирующей добавки позволяет получить требуемые характеристики дорожного вяжущего в процессе совмещения с нефтяным дорожным битумом марки БНД 90/130. При этом снижается себестоимость получаемого дорожного вяжущего за счет частичной замены дорогостоящего термоэластопласта более дешевым полиэтиленом низкой плотности. Проведенные исследования открывают перспективу дополнительного снижения себестоимости ПБВ за счет использования отходов тары и упаковки, при этом решается актуальная задача утилизации длительно разлагающихся отходов термопласта [14].

Список литературы

1. The Effect of Modifying Additives on the Consistency and Properties of Bitumen Binders / A. Plewa, P. S. Belyaev, K. A. Andrianov [et al.] // *Advanced Materials & Technologies*. – 2016. – No. 4. – P. 35 – 40. doi: 10.17277/amt.2016.04.pp.035-040
2. Chen, J. S. Asphalt Modified by Styrene–Butadiene–Styrene Triblock Copolymer: Morphology and Model / J. S. Chen, M. C. Liao, M. S. Shiah // *Journal of Materials in Civil Engineering*. – 2002. – No. 14 (3). – P. 224 – 229.
3. Zhu, J. Polymer Modification of Bitumen: Advances and Challenges / J. Zhu, B. Birgisson, N. Kringos // *European Polymer Journal*. – 2014. – No. 54. – P. 18 – 38.
4. Lucena, M. C. C. Characterization and Thermal Behavior of Polymer-Modified Asphalt / M. C. C. Lucena, S. A. Soares, J. B. Soares // *Materials Research*. – 2004. – No. 7 (4). – P. 529 – 534.
5. Radiation Effects on Styrene–Butadiene–Styrene Copolymer / Y. Zhang, S. Zhao, Y. Li [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2008. – Vol. 266, No. 15. – P. 3431 – 3436.
6. Модификация нефтяных дорожных битумов полимерными материалами для получения асфальтобетонных покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками / П. С. Беляев, Д. Л. Полушкин, П. В. Макеев, В. А. Фролов // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2016. – Т. 22, № 2. – С. 264 – 271. doi: 10.17277/vestnik.2016.02.pp.264-271
7. Решение проблемы утилизации полимерных отходов путем их использования в процессе модификации дорожного вяжущего / П. С. Беляев, О. Г. Маликов, С. А. Меркулов [и др.] // *Строит. материалы*. – 2013. – № 10. – С. 38 – 41.
8. Asphalt Modification with Different Polyethylene-Based Polymers / G. Polacco, S. Berlincioni, D. Biondi [et al.] // *European Polymer Journal*. – 2005. – Vol. 41, No. 12. – P. 2831 – 2844. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2005.05.034
9. Thermal and Rheological Properties of Maleated Polypropylene Modified Asphalt / P. H. Yeh, Y. H. Nien, J. H. Chen [et al.] // *Polymer Engineering and Science*. – 2005. – No. 45 (8). – P. 1152 – 1158.
10. Rheological Techniques as a Tool to Analyze Polymer-Bitumen Interactions: Bitumen Modified with Polyethylene and Polyethylene-Based Blends / O. González, J. J. Peña, M. E. Muñoz [et al.] // *Energy & Fuels*. – 2002. – Vol. 16, No. 5. – P. 1256 – 1263.
11. Improving Energy Efficiency of Bitumen Modification with Reclaimed Crumb Rubber / V. P. Belyaev, O. G. Malikov, S. A. Merkulov [et al.] // *Components of Scientific and Technological Progress*. – 2013. – № 1 (16). – P. 75 – 77.
12. EN 12591:2000. Вещества вяжущие битумные и битуминозные. Технические условия на дорожный битум = Bitumen and Bituminous Binders. Specifications for Paving Grade Bitumen / Всероссийский науч.-исслед. ин-т классификации, терминологии и информации по стандартизации и качеству. – М. : [б. и.], 2003. – 25 с.
13. ГОСТ Р 52056–2003. Вяжущие полимерно-битумные дорожные на основе блоксополимеров типа стирол–бутадиен–стирол. Технические условия. – Введ. 2004-01-01. – М. : Стандартинформ, 2007. – 5 с.
14. К вопросу о комплексном решении проблем экологии и качества дорожных покрытий / П. С. Беляев, О. Г. Маликов, С. А. Меркулов [и др.] // *Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского*. – 2012. – Спец. выпуск (39). – С. 184 – 189.

Interaction of the Components of the Modifying Additive in the Process of Producing a Polymeric-Bituminous Binder

V. A. Frolov, P. S. Belyaev, P. V. Makeev, V. P. Belyaev, I. V. Shashkov

*Department of Materials and Technology, polymers@asp.tstu.ru;
TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: bitumen modification; surfactants; polymer-bitumen binder; polyethylene; mixing; thermoplastic elastomer.

Abstract: To obtain polymer-bitumen binders, processes of mixing various modifiers with oil bitumen are used in order to give the binder higher quality indicators compared to the starting material. The problem of searching for compositions of modifiers providing the full range of required indicators of road binders remains relevant. Peculiarities of using modifiers based on thermoelastoplasts and thermoplastics for modifying mixed bitumen are considered. Responses were studied in the form of changes in the quality indicators of a binder when mixing bitumen with different volumes of thermoplastic elastomer and thermoplastic, in the presence or absence of surface-active substances, as well as their mixtures of various compositions. As a result of the research, a mathematical model was developed for the dependence of the characteristics of the polymer-bitumen binder on the content of the components introduced during the mixing process.

References

1. Plewa A., Belyaev P.S., Andrianov K.A., Zubkov A.F., Frolov V.A. The Effect of Modifying Additives on the Consistency and Properties of Bitumen Binders, *Advanced Materials & Technologies*, 2016, no. 4, pp. 35-40, doi: 10.17277/amt.2016.04.pp.035-040 (In Eng., abstract in Russ.)
2. Chen J.S., Liao M.C., Shiah M.S. Asphalt Modified by Styrene-Butadiene-Styrene Triblock Copolymer: Morphology and Model, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2002, no. 14 (3), pp. 224-229.
3. Zhu J., Birgisson B., Kringos N. Polymer Modification of Bitumen: Advances and Challenges, *European Polymer Journal*, 2014, no. 54, pp. 18-38.
4. Lucena M.C.C., Soares S.A., Soares J.B. Characterization and Thermal Behavior of Polymer-Modified Asphalt, *Materials Research*, 2004, no. 7 (4), pp. 529-534.
5. Zhang Y., Zhao S., Li Y., Xie L., Sheng K. Radiation Effects on Styrene-Butadiene-Styrene Copolymer, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2008, vol. 266, no. 15, pp. 3431-3436.
6. Belyaev P.S., Polushkin D.L., Makeev P.V., Frolov V.A. [Modification of oil road bitumen with polymeric materials to produce asphalt concrete pavements with enhanced performance characteristics], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 2, pp. 264-271, doi: 10.17277/vestnik.2016.02.pp.264-271 (In Russ., abstract in Eng.)
7. Belyaev P.S., Malikov O.G., Merkulov S.A., Polushkin D.L., Frolov V.A. [Solving the problem of recycling polymer wastes by using them in the process of modifying road binder], *Stroitel'nyye materialy* [Construction Materials], 2013, no. 10, pp. 38-41. (In Russ.)
8. Polacco G., Berlincioni S., Biondi D., Stastna J., Zanzotto L. Asphalt Modification with Different Polyethylene-Based Polymers, *European Polymer Journal*, 2005, vol. 41, no. 12, pp. 2831-2844, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2005.05.034

9. Yeh P.H., Nien Y.H., Chen J.H., Chen W.C., Chen J.S. Thermal and Rheological Properties of Maleated Polypropylene Modified Asphalt, *Polymer Engineering and Science*, 2005, no. 45 (8), pp. 1152-1158.
10. González O., Peña J.J., Muñoz M.E., Santamaría A., Pérez-Lepe A., Martínez-Boza F., Gallegos C. Rheological Techniques as a Tool to Analyze Polymer-Bitumen Interactions: Bitumen Modified with Polyethylene and Polyethylene-Based Blends, *Energy & Fuels*, 2002, vol. 16, no. 5, pp. 1256-1263.
11. Belyaev V.P., Malikov O.G., Merkulov S.A., Belyaev P.S., Polushkin D.L., Frolov V.A. Improving Energy Efficiency of Bitumen Modification with Reclaimed Crumb Rubber, *Components of Scientific and Technological Progress*, 2013, no. 1 (16), pp. 75-77.
12. EN 12591:2000. Bitumen and Bituminous Binders. Specifications for Paving Grade Bitumen, Moscow: [b. i.], 2003, 25 p. (In Russ.)
13. GOST R 52056–2003. *Vyazhushchiye polimerno-bitumnyye dorozhnyye na osnove bloksopolimerov tipa stirol–butadiyen–stirol. Tekhnicheskiye usloviya* [GOST R 52056–2003. Cementing polymer-bitumen road based on block copolymers of the styrene – butadiene – styrene type. Technical conditions], Moscow: Standartinform, 2007, 5 p. (In Russ.)
14. Belyaev P.S., Malikov O.G., Merkulov S.A., Polushkin D.L., Belyaev V.P. [On the complex solution of environmental problems and the quality of road surfaces], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2012, Special. issue 39, pp. 184-189. (In Russ., abstract in Eng.)
-

Die Wechselwirkung der Komponenten des modifizierenden Additivs bei der Herstellung eines Polymer-Bitumen-Bindemittels

Zusammenfassung: Für das Erhalten der Polymer-Bitumen-Bindemittel werden die Verfahren des Mischens verschiedener Modifiziermittel mit Ölbitumen verwendet, um dem Bindemittel im Vergleich zum Ausgangsmaterial höhere Qualitätsindikatoren zu geben. Das Problem der Suche nach Modifiziermitteln, die das gesamte Spektrum der erforderlichen Kennziffern für Straßenbindemittel gewährleisten, bleibt aktuell. Es sind die Besonderheiten der Verwendung von Modifiziermitteln auf der Basis von thermoplastischen Elastomeren und Thermoplasten zur Modifizierung von gemischtem Bitumen betrachtet. Die Reaktionen in Form von Änderungen der Qualitätsindikatoren eines Bindemittels beim Mischen von Bitumen mit unterschiedlichen Volumina von Thermoelastoplast und Thermoplast sind in Gegenwart oder Abwesenheit von Tensiden sowie Gemischen verschiedener Zusammensetzungen untersucht. Als Ergebnis der durchgeführten Studien ist ein mathematisches Modell der Abhängigkeit der Eigenschaften des Polymer-Bitumen-Bindemittels vom Inhalt der während des Mischprozesses eingegebenen Komponenten entwickelt.

Interaction des composants de l'additif modificateur dans le processus d'obtention d'un liant polymère-bitume

Résumé: Pour obtenir des liants polymères-bitumineux, on utilise des procédés de mélange de divers modificateurs avec du bitume de pétrole afin de donner au liant des indicateurs de qualité supérieurs à ceux du matériau de départ. Le problème de la recherche des compositions de modificateurs fournissant la gamme complète des indicateurs de liants routiers requis reste actuel. Sont examinées les particularités de

l'utilisation pour la modification du bitume à la base de thermoplastiques et de thermoplastiques. Sont étudiées les réponses sous forme s changements dans les indicateurs de la qualité du liant lors du mélange du bitume de différents volumes de thermoplastique, en présence ou en l'absence de tensioactifs, ainsi que de leurs mélanges de composition différente. À la suite des recherches menées, est élaboré un modèle mathématique de la dépendance des caractéristiques du liant polymère-bitume sur le contenu des composants introduits dans le processus de mélange.

Авторы: *Фролов Виктор Андреевич* – соискатель кафедры «Материалы и технология»; *Беляев Павел Серафимович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Материалы и технология»; *Макеев Павел Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы и технология»; *Беляев Вадим Павлович* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник управления фундаментальных и прикладных исследований; *Шашков Иван Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

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

РАЗДЕЛЕНИЕ ЭМУЛЬСИИ «ВОДА – ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ УГЛЕВОДОРОДЫ» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕЭМУЛЬГАТОРА ПРИРОДНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

**К. Х. Аль Фадхли, Н. Н. Балобаева,
А. И. Леонтьева, К. В. Брянкин**

*Кафедра «Химия и химические технологии», nach_utu@nnn.tstu.ru;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: деэмульгаторы; ионы солей; металлы в наноструктурированной форме; минеральные соли; высокотемпературная обработка; эмульсия.

Аннотация: Приведен состав деэмульгатора, содержащего компоненты природного происхождения, обеспечивающий разделение системы «вода – высокомолекулярные углеводороды» с эффективностью удаления воды до 97 %. Предложена модель процесса деэмульгирования, учитывающая атомарно-молекулярное воздействие деэмульгатора на гетероатомные органические соединения.

Введение

В процессе добычи углеводородного сырья из нефтеносных пластов при интенсивном перемешивании с пластовой водой образуются водонефтяные эмульсии. Переработка смеси углеводородного сырья с водой затруднительна ввиду различий в их физико-химических свойствах и коррозионного воздействия водных растворов минеральных солей, присутствующих в земной породе, окружающей нефтяную залежь. Процесс транспортирования водосодержащего углеводородного сырья по трубопроводам также усложняется [1 – 3].

Трудности возникают и в процессах переработки углеводородного сырья, содержащего воду, так как при вскипании воды в термических деструктивных процессах наблюдается кратковременное повышение давления паров нефтепродуктов, вытесняемых водяным паром, что неблагоприятно сказывается на работе оборудования термической переработки углеводородного сырья [4].

Выделение воды из углеводородного сырья проводится на нефтедобывающем промысле методом отстаивания, который характеризуется сравнительно низкой эффективностью по количеству выделенной воды. К более эффективным способам деэмульгации углеводородного сырья относится электрохимический, однако данный метод более энергетически затратен [5].

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для повышения эффективности процессов выделения воды из углеводородного сырья используются химические деэмульгаторы, которые принято разделять на две группы: ионогенные и неионогенные (соответственно образующие и не образующие ионы в водных растворах).

Ионогенные деэмульгаторы считаются менее эффективными. К ним относят нейтрализованные черный контакт и кислый гудрон, использование которых в настоящее время малоэффективно. К группе неионогенных деэмульгаторов относят сепарол, дисолван и др.

Молекула деэмульгатора характеризуется дифильной химической структурой, что заключается в ее родстве с молекулами водной фазы и неофильной среды. Часть молекулы имеет полярную гидроксильную группу, другая – неполярные длинноцепочечные липофильные радикалы (углеводородная цепь, например, C_nH_m). Таким образом, деэмульгатор выполняет роль буферного вещества на поверхности границы раздела дисперсной фазы и дисперсионной среды [6].

К наиболее часто применяемым в промышленных установках деэмульгаторам относятся: дисолваны V 2830, 3146-2, V 3431-1, V 2673, F-10 (фирма Hoechst, Германия); прогалиты R 2263, R 2669, R 2268, R 1265, R 2270 (фирма BONA); сепаролы WF-41, WK-25, WF-34, WF-42 (фирма BASF, Германия); деэмульгаторы R-11, M-240, F-929 (фирма Toho, Япония); десеканафт 20 (фирма CЕСА), доуфаксы DF-70N14D, DF-131D, DF-115D, DF-50C15D (фирма Dow Chemical); дипроксамин 157; проксанол 186.

В настоящее время более высокой эффективностью обладают композиционные деэмульгаторы, которые представляют собой жидкости, содержащие наночастицы активных компонентов. Основной тенденцией является обеспечение необходимой эффективности композиционных деэмульгаторов подбором их состава под углеводородное сырье конкретного месторождения путем эмпирического перебора возможных вариантов из нескольких смесей компонентов. Поиск наиболее эффективного состава деэмульгатора ведется с помощью оценки скорости и глубины обезвоживания водонефтяной эмульсии.

Известны нанодеэмульгаторы со специфическим механизмом воздействия, который обусловлен способностью молекул деэмульгаторов находиться в растворах с размером частиц 20...100 нм. Воздействие нанодеэмульгаторов основано на межмолекулярном взаимодействии жидких форм, обеспечивающих высокую эффективность действия деэмульгатора.

Помимо органических поверхностно-активных веществ известна высокая эффективность раствора поваренной соли в процессе разделения эмульсии «вода – высокомолекулярные углеводороды» [7].

Предложены деэмульгаторы на основе компонентов природного происхождения и оценена эффективность разделения эмульсий, в качестве основы для изготовления которых рекомендована композиция природного происхождения и структур поваренной и морской солей, прошедших температурную обработку при 1000 °С.

Для увеличения эффективности процесса разделения эмульсии «вода – высокомолекулярные углеводороды» предлагается использовать хлорид натрия в качестве активного компонента для изготовления композиционного деэмульгатора, растворимого в воде, но нерастворимого в нефтепродуктах, что позволит ускорить осаждение капель воды, распределенных в объеме нефтепродукта, за счет увеличения ее плотности и повышения скорости коагуляции капель.

В качестве носителя для изготовления деэмульгатора в процессе термохимического разделения эмульсий «вода – высокомолекулярные углеводороды» применяется структура, полученная в процессе сжигания нефтепродукта. Данный компонент предлагается использовать ввиду развитой поровой структуры, позволяющей создавать композицию с высоким значением удельной поверхности, обес-

печивающим увеличение эффективности предлагаемой композиции деэмульгатора в процессе разделения рассматриваемых эмульсий.

В качестве модификатора для увеличения эффективности деэмульгатора предлагается использовать наночастицы металлов. Подбор эффективного активного компонента осуществляли из наночастиц следующих металлов: Fe, Cu, Ni, Mn, W, Pt, Ti. Металлы вводили в состав композиции деэмульгатора путем перемешивания, после чего проверяли разделяющую способность полученной смеси в процессе деэмульгации эмульсии «вода – высокомолекулярные углеводороды».

Для оценки эффективности предложенных деэмульгаторов определяли количество выделившейся воды из эмульсии в результате отстаивания с использованием деэмульгаторов различного компонентного состава на основе предложенных минералов природного происхождения и наночастиц металлов.

Содержание воды в исходном углеводородном сырье и прошедшем стадию деэмульгирования определяли по методу Дина–Старка согласно ГОСТ 2477–2014. Методика предполагает определение количественного содержания воды в испытуемом нефтепродукте в процессе отгонки из него фракции с температурой кипения в интервале, совпадающем с температурой кипения воды. Конденсат собирается в мерном приемнике. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Для обеспечения полноты отгонки воды углеводородное сырье, характеризующееся высокой конечной температурой кипения, разбавляли растворителем, в качестве которого использовалась фракция перегонки углеводородного сырья с температурой кипения до 120 °С. За расчетное содержание воды принималось среднее значение ее содержания в углеводородном сырье. Для обеспечения точности определения содержания воды пробы испытуемого нефтепродукта анализировали в сертифицированной лаборатории.

Для определения объема выделившейся воды использовались приемники-ловушки объемом 25 см³ (при ожидаемом содержании воды более 25 см³); чашка фарфоровая № 4; цилиндр измерительный номинальной вместимостью 100 см³; электрическое нагревательное устройство – колбонагреватель LOIP с максимальной температурой нагрева 600 °С. Для конденсации паров испаренного нефтепродукта использовали холодильник типа ХПТ с длиной кожуха 300 мм.

Пробу углеводородов тщательно перемешивали встряхиванием в течение пяти минут. В промытую и высушенную колбу заливали 100 г исследуемого образца углеводородного сырья, отмеряли 100 г растворителя, в качестве которого использовали фракцию углеводородного сырья с температурой кипения до 150 °С.

Нагрев осуществляли при помощи колбонагревателя до достижения устойчивого каплеобразова-

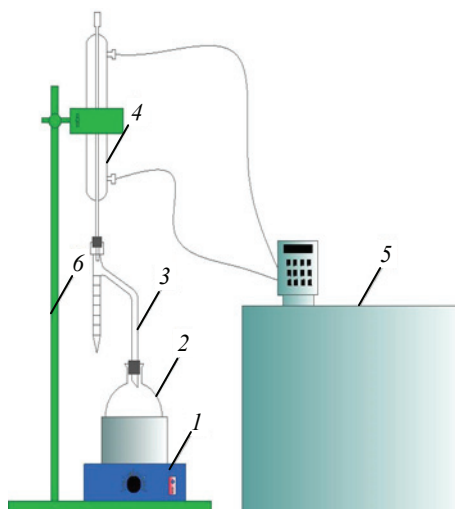


Рис. 1. Установка для определения содержания воды по методу Дина–Старка:

1 – колбонагреватель; 2 – колба круглодонная из термостойкого стекла; 3 – приемник-ловушка стеклянный; 4 – прямой холодильник; 5 – термостат; 6 – штатив

ния паров испаренной жидкости. Перегонку проводили до прекращения изменения объема дистиллята в приемнике-ловушке. Объем воды, собранный в приемнике-ловушке, фиксировали.

По результатам экспериментальных исследований по разделению эмульсии углеводородного сырья, содержащей 10 масс.% воды, при использовании деэмульгаторов с природными минералами, выявлен состав наибольшей эффективности, состоящей из структур поваренной соли и углеводов, прошедших высокотемпературную обработку, и наночастиц марганца.

Устойчивость рассматриваемой эмульсии зависит от концентрации минеральных водорастворимых солей, попадающих в углеводороды вместе с пластовой водой, окружающей нефтеносную прослойку. Частицы соли осаждаются на поверхности высокомолекулярных соединений углеводородного сырья, в том числе смол, асфальтенов и др. (рис. 2).

Состав деэмульгатора, показавшего наибольшую эффективность, представлен в табл. 1.

Основной компонент предложенной композиции – структура углеводов, полученная обработкой при 1000 °С, выполняющая функцию носителя для дополнительных химически активных добавок (наночастиц металлов и структуры поваренной соли), обладает развитой поверхностью, образованной в результате формирования свободных полостей в объеме материала в процессе сгорания углеводородных соединений.

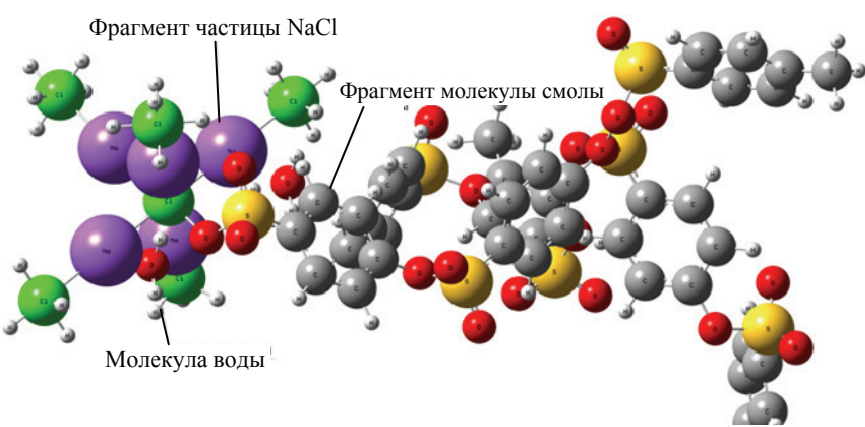


Рис. 2. Механизм сорбции молекул воды на поверхности кристалла соли

Таблица 1

Компонентный состав композиции деэмульгатора водонефтяной эмульсии

Компонент	Массовая доля в композиции, %
Структура углеводов, полученная при обработке при 1000 °С	60
Наночастицы металлов (Mn)	10
Структура поваренной соли, полученная при обработке при 1000 °С	30

В процессе изготовления деэмульгатора на основе компонентов природного происхождения на границах пор структуры углеводородов, прошедших высокотемпературную обработку, осаждаются наночастицы металлов, при температуре эмульсии «вода – углеводородное сырье» до 60...70 °С. При введении в смесь частиц NaCl, прошедших температурную обработку при 1000 °С, происходит их сорбция на поверхности наночастиц металлов (рис. 3).

Таким образом, наночастица металла в данном случае выполняет роль промежуточного звена в процессе сорбции кристаллов соли на поверхности структуры углеводорода, полученной при ее температурной обработке при 1000 °С.

Частицы соли, растворенные в эмульгированной в углеводородном сырье воде, при диссоциации формируют ионы Na^+ и Cl^- , которые в результате ионного обмена адсорбируются на поверхности кристалла структуры поваренной соли, прошедшей высокотемпературную обработку. В результате распределения частиц деэмульгатора в объеме эмульсии на поверхности кристаллов структуры соли, полученной при ее обработке при 1000 °С, осуществляется осаждение соли, растворенной в воде, входящей в состав эмульсии, что способствует коалесценции и осаждению капель воды в эмульсии (рис. 4).

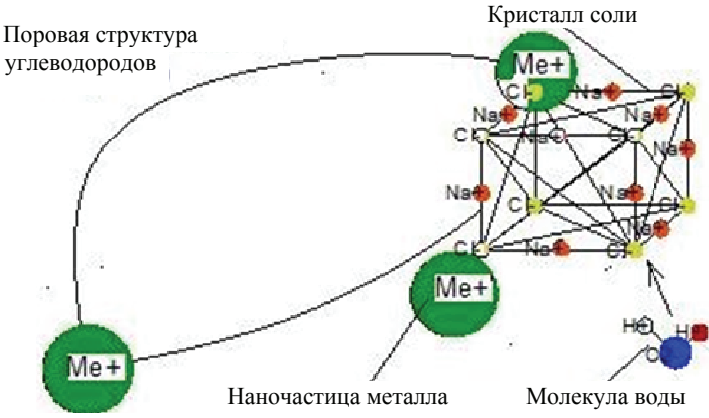


Рис. 3. Физическая модель деэмульгатора

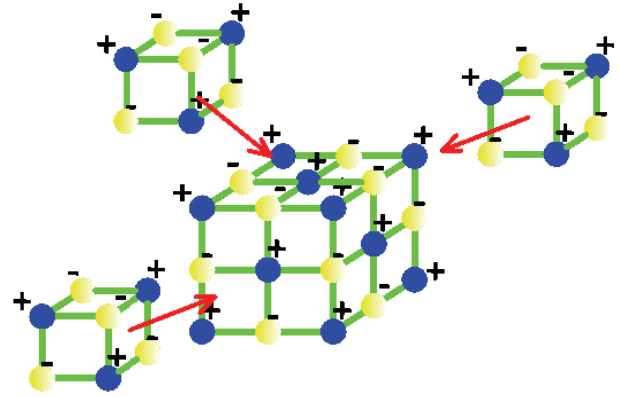


Рис. 4. Рост кристалла соли

Выводы

Приведен состав деэмульгатора, обеспечивающий разделение системы «вода – высокомолекулярные углеводороды» с эффективностью удаления воды до 97 %. Предложена модель процесса деэмульгирования эмульсии на основе атомарно-молекулярного воздействия деэмульгатора на гетероатомные органические соединения.

Список литературы

1. Левченко, Д. Н. Эмульсии нефти с водой и методы их разрушения / Д. Н. Левченко. – М. : Энергоиздат, 1987. – 464 с.
2. Бабак, В. Г. Эмульсии – гели, или двухжидкостные пены. Получение, свойства, применение : науч. доклад / В. Г. Бабак // Новейшие достижения в области науки о полимерах : общероссийский семинар, Заседание 16, 22 октября 2002 г., Москва. – М., 2002. – 38 с. – URL : <http://polymer.ac.ru/sites/polymer.ac.ru/data/seminars/22102002/seminar221002.pdf> (дата обращения: 16.06.2020).
3. Evdokimov, I. N. Excess Density in Oilfield Water - Crude Oil Dispersions / I. N. Evdokimov, N. Yu. Eliseev, V. A. Iktisanov // Journal of Colloid and Interface Science. – 2005. – Vol.285, No.2. – P.795 – 803.
4. Неппер, Д. Стабилизация коллоидных дисперсий полимерами / Д. Неппер ; пер. с англ. В. П. Привалко ; под ред. Ю. С. Липатова. – М. : Мир, 1986. – 487 с.
5. Dense Cluster Formation during Aggregation and Gelation of Attractive Slippery Nanoemulsion Droplets / J. N. Wilking, S. M. Graves, C. B. Chang [et al.] // Physical Review Letters. – 2006. – Vol. 96. – P. 015501.
6. Соруш, А. Моделирование электрообессоливающей установки для подготовки тяжелых нефтей / А. Соруш, Ф. М. Хуторянский, С. Бехназ // Технологии нефти и газа. – 2017. – № 1 (108). – С. 3 – 9.
7. Дунюшкина, Е. И. Рекомендации по оптимизации технологии обессоливания нефти / Е. И. Дунюшкина // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2002. – № 6. – С. 23 – 27.

Separation of the “Water – High Molecular Weight Hydrocarbons” Emulsion Using the Natural Origin Demulsifier

K. H. Al Fadhli, N. N. Balobaeva, A. I. Leontieva, K. V. Bryankin

*Department of Chemistry and Chemical Technology, nach_umu@nnn.tstu.ru;
TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: demulsifiers; salt ions; metals in nanostructured form; mineral salts; high-temperature processing; emulsion.

Abstract: The composition of a demulsifier containing components of natural origin is provided; it ensures the separation of the “water – high molecular weight hydrocarbons” system with a water removal efficiency of 97 %. A model of the process of demulsification of the “water – high molecular weight hydrocarbons” emulsion based on the atomic-molecular effects of the demulsifier on heteroatomic organic compounds is proposed.

References

1. Levchenko D.N. *Emul'sii nef'ti s vodoy i metody ikh razrusheniya* [Emulsions of oil with water and methods of their destruction], Moscow: Energoizdat, 1987, 464 p. (In Russ.)

2. <http://polymer.ac.ru/sites/polymer.ac.ru/data/seminars/22102002/seminar221002.pdf> (accessed 16 June 2020).
3. Evdokimov I.N., Eliseev N.Yu., Iktisanov V.A. Excess Density in Oilfield Water - Crude Oil Dispersions, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2005, vol. 285, no. 2, pp. 795-803.
4. Nepper D., Lipatov Yu.S. [Ed.] *Stabilizatsiya kolloidnykh dispersiy polimerami* [Stabilization of colloidal dispersions by polymers], Moscow: Mir, 1986, 487 p. (In Russ.)
5. Wilking J.N., Graves S.M., Chang C.B., Meleson K., Lin M.Y., Mason T.G. Dense Cluster Formation during Aggregation and Gelation of Attractive Slippery Nanoemulsion Droplets, *Physical Review Letters*, 2006, vol. 96, p. 015501.
6. Soroush A., Khutoryanskiy F.M., Bekhnaz S. [Modeling of an electric desalting plant for the preparation of heavy oils], *Tekhnologii nefi i gaza* [Oil and Gas Technologies], 2017, no. 1 (108), pp. 3-9. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Dunyushkina Ye.I. [Recommendations for optimizing the technology of desalination of oil], *Neftepererabotka i neftekhimiya* [Oil refining and petrochemicals], 2002, no. 6, pp. 23-27. (In Russ.)
-

Die Trennung der Emulsion “Wasser - hochmolekulare Kohlenwasserstoffe” unter Verwendung eines Demulgators natürlichen Ursprungs

Zusammenfassung: Es ist die Zusammensetzung eines Demulgators, der Bestandteile natürlichen Ursprungs enthält, vorgestellt, wodurch die Trennung des Wasser-hochmolekulare Kohlenwasserstoffe-Systems mit einer Wasserentfernungseffizienz von 97 % sichergestellt wird. Es ist ein Modell der Emulsionsentmischung “Wasser – hochmolekulare Kohlenwasserstoffe” vorgeschlagen, das auf den atommolekularen Wirkungen des Demulgators auf heteroatomare organische Verbindungen basiert.

Séparation de l'émulsion “eau – hydrocarbures de haut poids moléculaire” à l'aide d'un désémulsifiant d'origine naturelle

Résumé: Est citée la composition du désémulsifiant contenant des composants d'origine naturelle assurant la séparation du système “eau – hydrocarbures de haut poids moléculaire” avec une efficacité de l'élimination de l'eau de 97 %. Est proposé un modèle du processus de la désémulsification de l'émulsion “eau – hydrocarbures de haut poids moléculaire” à la base de l'effet atomique-moléculaire du désémulsifiant sur les composés organiques hétéroatomiques.

Авторы: *Аль Фадхли Кхазал Хамид* – аспирант кафедры «Химия и химические технологии»; *Балобаева Нина Николаевна* – аспирант кафедры «Химия и химические технологии»; *Леонтьева Альбина Ивановна* – доктор технических наук, профессор кафедры «Химия и химические технологии»; *Брянкин Константин Вячеславович* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Химия и химические технологии», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ЖИДКОСТЕЙ

А. В. Рухов¹, Е. Н. Туголуков², А. Дж. Аль-Шариф²

*Кафедры: «Химия и химические технологии» (1);
«Техника и технологии производства нанопродуктов» (2),
tugolukov.en@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: теплоотдача жидкости; углеродные нанотрубки.

Аннотация: Дано описание экспериментальных исследований процесса теплоотдачи воды, содержащей наномодификатор, представляющий собой функционализированные углеродные нанотрубки серии «Таунит». Приведены схема экспериментальной установки для исследования теплоотдачи жидкостей, методики выполнения экспериментальных исследований и обработки результатов измерений. Представлены результаты исследования влияния концентрации наномодификатора на теплоотдачу воды.

Исследование путей интенсификации процессов теплопередачи в теплообменном оборудовании является актуальной научно-технической задачей. Одним из направлений ее решения являются мероприятия, обеспечивающие повышение теплоотдачи от теплоносителя, лимитирующего процесс теплопередачи в целом. При отсутствии фазовых переходов в теплоносителе коэффициент теплоотдачи в значительной мере зависит от теплопроводности теплоносителя, которая определяет термическое сопротивление теплового пограничного слоя.

В ряде публикаций, например [1, 2], приводятся результаты исследований, посвященных зависимостям теплофизических характеристик типовых теплоносителей от концентрации диспергированных в них наноразмерных металлических или неметаллических частиц.

В статье показаны результаты исследования влияния наномодификатора, представляющего собой функционализированные углеродные нанотрубки (УНТ) серии «Таунит», на теплоотдачу воды. Процессы получения УНТ серии «Таунит» и их функционализация рассмотрены во многих работах, в том числе [3]. Целью данного этапа исследований является обоснование целесообразности (или выяснение бесперспективности) проведения полномасштабных исследований интенсификации процессов теплопередачи в теплообменном оборудовании путем наномодифицирования типовых теплоносителей, используемых в теплообменных процессах.

Схема лабораторной экспериментальной установки для исследования коэффициентов теплоотдачи жидкостей приведена на рис. 1. Показания датчиков температур и расходов регистрируются во времени до достижения стационарного температурного режима. Погрешности измерения температур и расходов теплоносителей составляет соответственно 0,25 °С и 1,0 мл/с. Для расчета значений коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи используются данные, полученные в стационарном режиме. Расходы теплоносителей задаются таким образом, чтобы

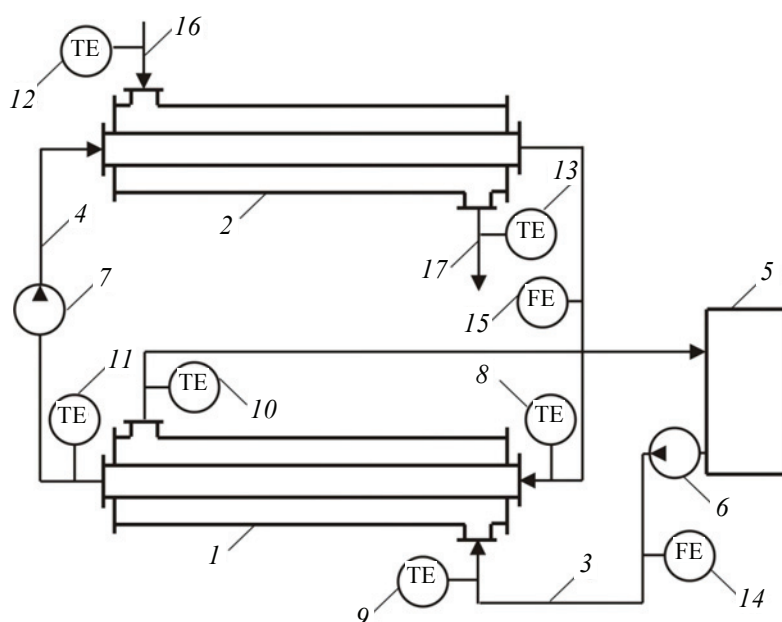


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования коэффициентов теплоотдачи наномодифицированных жидкостей:

1, 2 – стеклянные лабораторные теплообменники «труба в трубе»; 3, 4 – контуры горячего теплоносителя и исследуемой жидкости соответственно; 5 – термостат; 6, 7 – насосы термостата и исследуемой жидкости соответственно; 8 – 13 – температурные датчики; 14, 15 – датчики расхода теплоносителей; 16 – вход магистральной охлаждающей воды; 17 – отвод охлаждающей воды в канализацию

коэффициент теплоотдачи от исследуемой жидкости был существенно меньше коэффициента теплоотдачи от горячего теплоносителя. При этом процесс теплопередачи в целом лимитируется теплоотдачей от исследуемой жидкости, что необходимо для корректного расчета значения коэффициента теплоотдачи от исследуемой жидкости.

Методика выполнения экспериментальных исследований включает определение коэффициентов теплоотдачи от дистиллированной воды и воды с определенной концентрацией наномодификатора при стационарных температурных условиях с одинаковыми начальной температурой горячего теплоносителя и его объемном расходе.

Методика обработки экспериментальных данных основана на использовании математической модели температурных полей теплообменника типа «труба в трубе», включающей температурные поля потоков теплоносителей, стенки трубки, разделяющей потоки, и корпуса теплообменника. В математической модели использованы решения дифференциальных уравнений с соответствующими условиями однозначности [4]. Физическая размерность всех величин – система СИ.

Температурное поле потока исследуемой жидкости в центральном канале теплообменника описывается решением дифференциального уравнения переноса тепла жидкостью, движущейся в режиме идеального вытеснения по каналу в условиях теплообмена со стенкой канала:

$$t(x) = t_F + (t_0 - t_F) \exp(-Kx);$$

$$K = \frac{\alpha \Pi}{Gc}.$$

Здесь $t(x)$ – текущая температура исследуемой жидкости, °C; x – пространственная координата по направлению движения потока жидкости, м; G – массовый расход жидкости, кг/с; c – теплоемкость жидкости, Дж/(кг·°C); Π – омываемый периметр внутренней стенки центрального канала, м; α – коэффициент конвективной теплоотдачи от внутренней стенки центрального канала к жидкости, Вт/(м²·°C); t_0 – начальная температура жидкости (на текущем участке), °C; t_F – температура внутренней стенки центрального канала, °C.

Температурное поле потока горячего теплоносителя в кольцевом канале теплообменника описывается решением того же дифференциального уравнения, как и температурное поле потока исследуемой жидкости, но с учетом наличия двух поверхностей с различными температурами:

$$t_1(x) = V + (t_0 - V) \exp(-K_1 x);$$

$$K_1 = \frac{\alpha_1 \Pi_1 + \alpha_2 \Pi_2}{G_1 c_1};$$

$$V = \frac{\alpha_1 \Pi_1 t_{F1} + \alpha_2 \Pi_2 t_{F2}}{\alpha_1 \Pi_1 + \alpha_2 \Pi_2},$$

где $t_1(x)$ – текущая температура горячего теплоносителя, °C; x – пространственная координата по направлению движения потока, м; G_1 – массовый расход горячего теплоносителя, кг/с; c_1 – теплоемкость горячего теплоносителя, Дж/(кг·°C); Π_1 – омываемый периметр наружной стенки центрального канала, м; Π_2 – омываемый периметр внутренней стенки корпуса, м; α_1 – коэффициент конвективной теплоотдачи от наружной стенки центрального канала к жидкости; α_2 – коэффициент конвективной теплоотдачи от внутренней стенки корпуса к жидкости; t_{F1} , t_{F2} – температуры наружной стенки центрального канала и внутренней стенки корпуса, °C, соответственно.

Температурное поле стенки центрального канала описывается решением стационарной задачи теплопроводности для полого неограниченного цилиндра:

$$t_t(r) = A \ln(r) + B;$$

$$B = t_c + A \left(\frac{\lambda}{\alpha R_1} - \ln(R_1) \right);$$

$$A = \frac{t_{c1} - t_c}{\frac{\lambda}{\alpha_1 R_2} + \frac{\lambda}{\alpha R_1} + \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)},$$

где r – пространственная радиальная координата, м; $t_t(r)$ – температурное поле стенки центрального канала, °C; λ – теплопроводность материала стенки центрального канала, Вт/(м·°C); t_c , t_{c1} – соответственно средние температуры исследуемой жидкости и горячего теплоносителя (на текущем участке), °C; R_1 , R_2 – соответственно внутренний и наружный радиусы стенки центрального канала, м.

Температурное поле стенки корпуса теплообменника $t_k(r)$ определяется по тем же формулам, что и температурное поле стенки центральной трубки со следующими заменами:

– внутреннего и наружного радиусов стенки центрального канала соответственно на внутренний и наружный радиусы стенки корпуса;

- теплопроводности материала стенки центрального канала на теплопроводность материала стенки корпуса;
- коэффициентов конвективной теплоотдачи от внутренней и наружной стенок центрального канала соответственно на коэффициенты конвективной теплоотдачи от внутренней и наружной стенок корпуса;
- средней температуры исследуемой жидкости на среднюю температуру горячего теплоносителя;
- средней температура горячего теплоносителя на температуру окружающей среды.

Алгоритм обработки экспериментальных данных включает определение поправочного коэффициента к значению коэффициента конвективной теплоотдачи от исследуемой жидкости, рассчитанному по критериальному уравнению для потока при вынужденном движении в прямой трубе круглого сечения [5], при котором расчетное значение выходной температуры исследуемой жидкости отличается от измеренной температурным датчиком 11 менее чем на $0,1$ °C. Такой способ оценки интенсивности процессов теплоотдачи выбран, чтобы обеспечить возможность сравнения результатов исследования при варьировании расходов исследуемой жидкости.

В качестве исследуемой жидкости использовались дистиллированная вода без наномодификатора и с наномодификатором в количествах 0,01, 0,05 и 0,1 масс.%. Выбранный диапазон обусловлен экономической целесообразностью интенсификации теплообменных процессов при минимальных расходах наномодификатора. В качестве наномодификатора использовались УНТ, функционализированные по методике, представленной в [6]. Для каждого вида исследуемой жидкости выполнено не менее 120 независимых измерений стационарных температур при ряде фиксированных расходов и незначительных изменениях температуры окружающей среды. При этом значения критерия Рейнольдса для исследуемой жидкости находились в интервале 900...1600, что обеспечивало требуемое лимитирование процесса теплопередачи теплоотдачей от исследуемой жидкости.

Далее представлены полученные значения степени повышения коэффициента теплоотдачи K от дистиллированной воды с внесенным наномодификатором по отношению к коэффициенту теплоотдачи от дистиллированной воды без добавок:

УНТ, масс.%	0,01	0,05	0,1
K , %	4,7	14,2	21,3

Данные результаты обосновывают целесообразность использования функционализированных УНТ серии «Таунит» в качестве наномодификатора жидких теплоносителей для интенсификации процессов конвективной теплоотдачи в тех случаях, когда теплопередача лимитируется теплоотдачей от теплоносителя. Кроме того, необходимо проведение дальнейших исследований по интенсификации процессов теплопередачи в теплообменном оборудовании для других типов жидких теплоносителей и наномодификаторов на основе УНМ «Таунит».

Список литературы

1. Choi, S. U. S. Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles / S. U. S. Choi, J. A. Eastman // Conference: International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, 12 – 17 November, 1995, San Francisco, CA (United States). – United States, 1995. – Vol. 231. – P. 99 – 106.
2. Xuan, Y. Heat Transfer Enhancement of Nanofluids / Y. Xuan, Q. Li // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2000. – Vol. 21, No. 1. – P. 58 – 64.

3. Окисление многослойных углеродных нанотрубок в парах перекиси водорода: закономерности и эффекты / Т. П. Дьячкова, Ю. А. Хан, Н. В. Орлова, С. В. Кондрашов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 2. – С. 323 – 333. doi: 10.17277/vestnik.2016.02.pp.323-333

4. Туголуков, Е. Н. Математическое моделирование технологического оборудования многоассортиментных химических производств : монография / Е. Н. Туголуков. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 100 с.

5. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М. : Гос. науч.-техн. изд-во хим. литературы, 1961. – 830 с.

6. Исследование теплопроводности наномодифицированных жидкостей / Е. Н. Туголуков, А. Дж. Аль-Шариф, Т. П. Дьячкова, Е. А. Буракова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2019. – Т. 25, № 4. – С. 671 – 677. doi: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.671-677

The Research into Heat Transfer of Nanomodified Liquids

A. V. Rukhov¹, E. N. Tugolukov², A. J. Al-Sharif²

*Departments of Chemistry and chemical technology (1);
Technique and production technology of nanoproducs (2),
tugolukov.en@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: heat transfer of liquid; carbon nanotubes.

Abstract: A description of experimental studies of the heat transfer process of water containing a nanomodifier, which is a functionalized carbon nanotube of the Taunitseries, is given. A diagram of an experimental setup for studying the heat transfer of liquids, methods for performing experimental research and processing measurement results are presented. The results of a study of the effect of the concentration of nanomodifier on the heat transfer of water are discussed.

References

1. Choi S.U.S., Eastman J.A. Conference, International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, 12 - 17 November, 1995, San Francisco, CA (United States), United States, 1995, vol. 231, pp. 99-106.

2. Xuan Y., Li Q. Heat Transfer Enhancement of Nanofluids, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2000, vol. 21, no. 1, pp. 58-64.

3. D'yachkova T.P., Khan Yu.A., Orlova N.V., Kondrashov S.V. [Oxidation of multilayer carbon nanotubes in hydrogen peroxide vapor: patterns and effects], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 2, pp. 323-333, doi: 10.17277/vestnik.2016.02.pp.323-333 (In Russ., abstract in Eng.)

4. Tugolukov Ye.N. *Matematicheskoye modelirovaniye tekhnologicheskogo oborudovaniya mnogoassortimentnykh khimicheskikh proizvodstv: monografiya* [Mathematical modeling of technological equipment of multi-assortment chemical plants: monograph], Moscow: Mashinostroyeniye-1, 2004, 100 p. (In Russ.)

5. Kasatkin A.G. *Osnovnyye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Main processes and apparatuses of chemical technology], Moscow: Gosudarstvennoye nauchno-tekhnicheskoye izdatel'stvo khimicheskoy literatury, 1961, 830 p. (In Russ.)

6. Tugolukov Ye.N., Al'-Sharif A.Dzh., D'yachkova T.P., Burakova Ye.A. [The study of thermal conductivity of nanomodified liquids], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 4, pp. 671-677, doi: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.671-677 (In Russ., abstract in Eng.)

Untersuchung der Wärmeübertragung der nanomodifizierten Flüssigkeiten

Zusammenfassung: Es ist die Beschreibung der experimentellen Untersuchungen des Wärmeübertragungsprozesses von Wasser mit einem Nanomodifikator beschrieben, der funktionalisierte Kohlenstoffnanoröhrchen der Taunit-Reihe ist. Es ist ein Schema der experimentellen Anlage für die Untersuchung der Wärmeübertragung von Flüssigkeiten, Verfahren zur Durchführung von experimentellen Studien und Verarbeitung von Messergebnissen angeführt. Die Ergebnisse der Untersuchung der Auswirkungen der Konzentration von Nanomodifikatoren auf die Wärmeübertragung von Wasser sind vorgestellt.

Etude de la dissipation thermique des fluides nanomodifiés

Résumé: Est donnée une description des études expérimentales du processus du transfert de la chaleur de l'eau contenant un nanodifiant, qui présente une série de nanotubes de carbone fonctionnalisés de la série «taunite». Sont mentionnés le schéma de l'installation expérimentale pour l'étude du transfert de la chaleur des liquides, les méthodes d'exécution des études expérimentales et le traitement des résultats de mesure. Sont présentés les résultats de l'étude de l'influence de la concentration de nanodifiant sur la dissipation de la chaleur de l'eau.

Авторы: *Рухов Артём Викторович* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Химия и химические технологии»; *Туголуков Евгений Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов»; *Аль-Шариф Али Джалаль* – аспирант кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

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

**COUPLED THERMO-ELECTRO-MECHANICAL ANALYSIS
OF HYBRID LAYERED CYLINDRICAL SHELLS WITH
PIEZOELECTRIC SENSORS AND ACTUATORS**

G. M. Kulikov, N. P. Merkusheva, M. G. Kulikov, S. V. Plotnikova

*Laboratory of Intelligent Materials and Structures, gmkulikov@mail.ru;
Tambov State Technical University, Tambov, Russia*

Keywords: layered piezoelectric shell; thermopiezoelectricity; 3D stress analysis; sampling surfaces method.

Abstract: This paper focuses on the implementation of the sampling surfaces (SaS) method for solving the three-dimensional coupled problems for layered piezoelectric shells subjected to thermal and electromechanical loading. The SaS method is based on choosing inside the n th layer I_n SaS parallel to the middle surface in order to introduce the temperatures, electric potentials and displacements of these surfaces as basic unknowns. Such choice of unknowns with the consequent use of the Lagrange polynomials of degree $I_n - 1$ in assumed approximations of the temperature, electric potential, displacements and mechanical material properties through the thickness of the layer leads to an efficient thermopiezoelectric shell model. The inner SaS are located inside each layer at Chebyshev polynomial nodes that allows one to minimize uniformly the error due to the Lagrange interpolation of high order. As a result, the SaS method can be applied efficiently for obtaining the analytical solutions for hybrid layered cylindrical shells with piezoelectric sensors and actuators, which asymptotically approach the exact solutions of thermopiezoelectricity as the number of SaS I_n tends to infinity.

Introduction

Three-dimensional (3D) analysis of layered piezoelectric plates and shells under thermal loading has received considerable attention during past twenty years (see, e.g. [1, 2]). There are at least five approaches to 3D exact solutions of thermoelectroelasticity for piezoelectric plates and shells, namely, the Pagano approach [3 – 7], the state space approach [8 – 12], the power series expansion approach [13 – 15], the asymptotic expansion approach [16], and the sampling surfaces (SaS) approach [17 – 19].

In this paper, the SaS approach is utilized for the first time for the coupled thermoelectroelastic stress analysis of hybrid layered composite shells with piezoelectric sensors and actuators. According to the SaS approach [20], we choose arbitrarily located surfaces inside the n th layer parallel to the middle surface of a shell $\Omega^{(n)1}, \Omega^{(n)2}, \dots, \Omega^{(n)I_n}$ to introduce temperatures $T^{(n)1}, T^{(n)2}, \dots, T^{(n)I_n}$, electric

potentials $\varphi^{(n)1}, \varphi^{(n)2}, \dots, \varphi^{(n)I_n}$ and displacement vectors $\mathbf{u}^{(n)1}, \mathbf{u}^{(n)2}, \dots, \mathbf{u}^{(n)I_n}$ of these surfaces as basic shell variables, where I_n is the total number of SaS of the n th layer ($I_n \geq 3$). Such choice of temperatures, electric potentials and displacements with the consequent use of the Lagrange polynomials of degree $I_n - 1$ in the assumed distributions of the temperature, electric potential, displacements and mechanical properties through the thickness of the layer allows the presentation of governing equations of the SaS shell formulation in a very compact form.

It should be noted that the SaS shell formulation with equally spaced SaS [21 – 23] does not work properly with the Lagrange polynomials of high degree because of Runge's phenomenon [24]. This phenomenon yields the wild oscillation at the edges of the interval when the user deals with some specific functions similar to the shell metric functions. If the number of equispaced nodes is increased then the oscillations become even larger. However, the use of the Chebyshev polynomial nodes inside the shell body [20, 25, 26] can help to improve significantly the behavior of the Lagrange polynomials of high degree because such a choice permits one to minimize uniformly the error due to the Lagrange interpolation. This fact gives an opportunity to obtain the stresses with a prescribed accuracy using the sufficiently large number of SaS. It means in turn that the solutions based on the SaS concept *asymptotically* approach the 3D exact solutions of thermoelectroelasticity as $I_n \rightarrow \infty$.

Description of displacement and strain fields

We consider a layered shell of the thickness h . Let the middle surface Ω be described by orthogonal curvilinear coordinates θ_1 and θ_2 , which are referred to the lines of principal curvatures of its surface. The thickness coordinate θ_3 is oriented in the normal direction. Introduce the following notations: $A_\alpha(\theta_1, \theta_2)$ are the coefficients of the first fundamental form; $k_\alpha(\theta_1, \theta_2)$ are the principal curvatures of the middle surface; $c_\alpha = 1 + k_\alpha \theta_3$ are the components of the shifter tensor; $c_\alpha^{(n)i_n}(\theta_1, \theta_2)$ are the components of the shifter tensor at SaS of the n th layer $\Omega^{(n)i_n}$ (Fig. 1) defined as

$$c_\alpha^{(n)i_n} = c_\alpha(\theta_3^{(n)i_n}) = 1 + k_\alpha \theta_3^{(n)i_n}, \quad (1)$$

where $\theta_3^{(n)i_n}$ are the transverse coordinates of SaS given by

$$\begin{aligned} \theta_3^{(n)1} &= \theta_3^{[n-1]}, \quad \theta_3^{(n)I_n} = \theta_3^{[n]}, \\ \theta_3^{(n)m_n} &= \frac{1}{2}(\theta_3^{[n-1]} + \theta_3^{[n]}) - \frac{1}{2}h^{(n)} \cos\left(\pi \frac{2m_n - 3}{2(I_n - 2)}\right), \end{aligned} \quad (2)$$

where $\theta_3^{[n-1]}$ and $\theta_3^{[n]}$ are the transverse coordinates of layer interfaces $\Omega^{[n-1]}$ and $\Omega^{[n]}$; $h^{(n)} = \theta_3^{[n]} - \theta_3^{[n-1]}$ is the thickness of the n th layer. It is worth noting that the transverse coordinates of inner SaS $\theta_3^{(n)m_n}$ coincide with the coordinates of the Chebyshev polynomial nodes. This fact has a great meaning for the convergence of the SaS method [20].

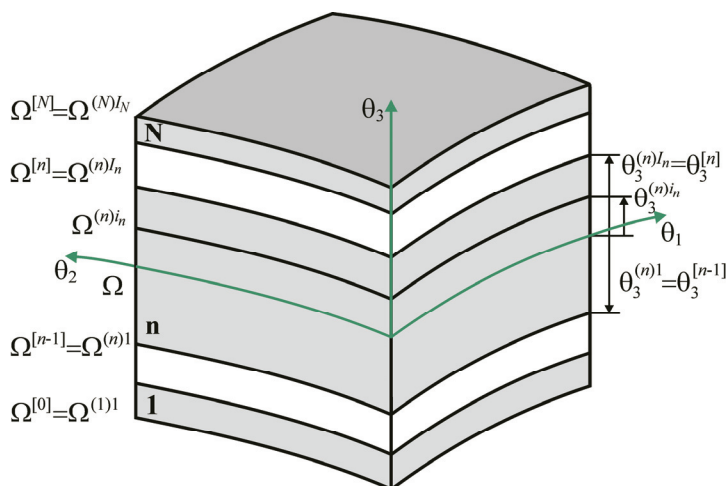


Fig. 1. Geometry of the layered shell

Here, the index n identifies the belonging of any quantity to the n th layer and runs from 1 to N , where N is the number of layers; the index m_n identifies the belonging of any quantity to the inner SaS of the n th layer and runs from 2 to $I_n - 1$; the indices i_n , j_n , k_n describe all SaS of the n th layer and run from 1 to I_n ; Latin tensorial indices i, j, k, l range from 1 to 3; Greek indices α, β range from 1 to 2.

We start now with the first two assumptions of the proposed layered piezoelectric shell formulation. The displacement and strain fields are distributed through the thickness of the n th layer [20] as follows:

$$u_i^{(n)} = \sum_{i_n} L^{(n)i_n} u_i^{(n)i_n}, \quad \theta_3^{[n-1]} \leq \theta_3 \leq \theta_3^{[n]}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ij}^{(n)} = \sum_{i_n} L^{(n)i_n} \varepsilon_{ij}^{(n)i_n}, \quad \theta_3^{[n-1]} \leq \theta_3 \leq \theta_3^{[n]}, \quad (4)$$

where $u_i^{(n)i_n}(\theta_1, \theta_2)$ and $\varepsilon_{ij}^{(n)i_n}(\theta_1, \theta_2)$ are the displacements and strains of SaS of the n th layer $\Omega^{(n)i_n}$; $L^{(n)i_n}(\theta_3)$ are the Lagrange polynomials of degree $I_n - 1$ given by

$$u_i^{(n)i_n} = u_i(\theta_3^{(n)i_n}), \quad (5)$$

$$\varepsilon_{ij}^{(n)i_n} = \varepsilon_{ij}(\theta_3^{(n)i_n}), \quad (6)$$

$$L^{(n)i_n} = \prod_{j_n \neq i_n} \frac{\theta_3 - \theta_3^{(n)j_n}}{\theta_3^{(n)i_n} - \theta_3^{(n)j_n}}. \quad (7)$$

The strains of SaS of the n th layer in terms of displacements of SaS are expressed as

$$2\varepsilon_{\alpha\beta}^{(n)i_n} = \frac{1}{c_\beta^{(n)i_n}} \lambda_{\alpha\beta}^{(n)i_n} + \frac{1}{c_\alpha^{(n)i_n}} \lambda_{\beta\alpha}^{(n)i_n},$$

$$2\varepsilon_{\alpha 3}^{(n)i_n} = \frac{1}{c_{\alpha}^{(n)i_n}} \lambda_{3\alpha}^{(n)i_n} + \beta_{\alpha}^{(n)i_n}, \quad \varepsilon_{33}^{(n)i_n} = \beta_3^{(n)i_n}, \quad (8)$$

where $\lambda_{i\alpha}^{(n)i_n}$ are the strain parameters of SaS of the n th layer [20]; $\beta_i^{(n)i_n} = u_{i,3}(\theta_3^{(n)i_n})$ are the values of the derivative of displacements with respect to the thickness coordinate on SaS defined as

$$\lambda_{\alpha\alpha}^{(n)i_n} = \frac{1}{A_{\alpha}} u_{\alpha,\alpha}^{(n)i_n} + B_{\alpha} u_{\beta}^{(n)i_n} + k_{\alpha} u_3^{(n)i_n}, \quad \lambda_{\beta\alpha}^{(n)i_n} = \frac{1}{A_{\alpha}} u_{\beta,\alpha}^{(n)i_n} - B_{\alpha} u_{\alpha}^{(n)i_n},$$

$$\lambda_{3\alpha}^{(n)i_n} = \frac{1}{A_{\alpha}} u_{3,\alpha}^{(n)i_n} - k_{\alpha} u_{\alpha}^{(n)i_n} \quad \text{for } \beta \neq \alpha, \quad (9)$$

$$\beta_i^{(n)i_n} = \sum_{j_n} M^{(n)j_n}(\theta_3^{(n)i_n}) u_i^{(n)j_n}, \quad (10)$$

where $M^{(n)j_n} = L_3^{(n)j_n}$ are the derivatives of Lagrange polynomials; their values on SaS are calculated as

$$M^{(n)j_n}(\theta_3^{(n)i_n}) = \frac{1}{\theta_3^{(n)j_n} - \theta_3^{(n)i_n}} \prod_{k_n \neq i_n, j_n} \frac{\theta_3^{(n)i_n} - \theta_3^{(n)k_n}}{\theta_3^{(n)j_n} - \theta_3^{(n)k_n}} \quad \text{for } j_n \neq i_n,$$

$$M^{(n)i_n}(\theta_3^{(n)i_n}) = - \sum_{j_n \neq i_n} M^{(n)j_n}(\theta_3^{(n)i_n}). \quad (11)$$

It is seen from formula (10) that the key functions $\beta_i^{(n)i_n}$ of the layered shell formulation are represented as a linear combination of displacements of SaS of the n th layer $u_i^{(n)j_n}$.

Description of electric field

Next, we introduce the third and fourth assumptions of the proposed layered thermopiezoelectric shell formulation. The electric potential and the electric field are distributed through the thickness of the n th layer [18] as follows:

$$\varphi^{(n)} = \sum_{i_n} L^{(n)i_n} \varphi^{(n)i_n}, \quad \theta_3^{[n-1]} \leq \theta_3 \leq \theta_3^{[n]}, \quad (12)$$

$$E_i^{(n)} = \sum_{i_n} L^{(n)i_n} E_i^{(n)i_n}, \quad \theta_3^{[n-1]} \leq \theta_3 \leq \theta_3^{[n]}, \quad (13)$$

where $\varphi^{(n)i_n}(\theta_1, \theta_2)$ are the electric potentials of SaS of the n th layer; $E_i^{(n)i_n}(\theta_1, \theta_2)$ are the components of the electric field at SaS of the n th layer defined as

$$\varphi^{(n)i_n} = \varphi(\theta_3^{(n)i_n}), \quad (14)$$

$$E_i^{(n)i_n} = E_i(\theta_3^{(n)i_n}). \quad (15)$$

The electric field on SaS of the n th layer in terms of electric potentials of SaS is given by

$$E_{\alpha}^{(n)i_n} = -\frac{1}{A_{\alpha}c_{\alpha}^{(n)i_n}}\varphi_{,\alpha}^{(n)i_n}, \quad (16)$$

$$E_3^{(n)i_n} = -\sum_{j_n} M^{(n)j_n}(\theta_3^{(n)i_n})\varphi^{(n)j_n}. \quad (17)$$

As can be seen from formula (17), the normal components of the electric field on SaS of the n th layer $E_3^{(n)i_n}$ are represented as a linear combination of electric potentials of SaS of the same layer $\varphi^{(n)j_n}$.

Description of temperature field

The following step consists in a choice of the suitable approximation of the temperature and temperature gradient through the shell thickness. The temperature and temperature gradient are distributed through the thickness of the n th layer [18] as follows:

$$T^{(n)} = \sum_{i_n} L^{(n)i_n} T^{(n)i_n}, \quad \theta_3^{[n-1]} \leq \theta_3 \leq \theta_3^{[n]}, \quad (18)$$

$$\Gamma_i^{(n)} = \sum_{i_n} L^{(n)i_n} \Gamma_i^{(n)i_n}, \quad \theta_3^{[n-1]} \leq \theta_3 \leq \theta_3^{[n]}, \quad (19)$$

where $T^{(n)i_n}(\theta_1, \theta_2)$ are the temperatures of SaS of the n th layer; $\Gamma_i^{(n)i_n}(\theta_1, \theta_2)$ are the components of the temperature gradient on SaS of the n th layer defined as

$$T^{(n)i_n} = T(\theta_3^{(n)i_n}), \quad (20)$$

$$\Gamma_i^{(n)i_n} = \Gamma_i(\theta_3^{(n)i_n}). \quad (21)$$

The components of the temperature gradient on SaS of the n th layer in terms of temperatures of SaS [18] are expressed as

$$\Gamma_{\alpha}^{(n)i_n} = \frac{1}{A_{\alpha}c_{\alpha}^{(n)i_n}} T_{,\alpha}^{(n)i_n}, \quad (22)$$

$$\Gamma_3^{(n)i_n} = \sum_{j_n} M^{(n)j_n}(\theta_3^{(n)i_n}) T^{(n)j_n}. \quad (23)$$

It is seen from formula (23) that the normal components of the temperature gradient at SaS of the n th layer $\Gamma_3^{(n)i_n}$ are represented as a linear combination of temperatures of SaS of the same layer $T^{(n)j_n}$.

Constitutive equations

As constitutive equations, we accept Fourier heat conduction equations

$$q_i^{(n)} = -k_{ij}^{(n)} \Gamma_j^{(n)}, \quad \theta_3^{[n-1]} \leq \theta_3 \leq \theta_3^{[n]}, \quad (24)$$

where $q_i^{(n)}$ are the components of the heat flux of the n th layer; $k_{ij}^{(n)}$ are the thermal conductivities. Here and below, the summation on repeated Latin indices is implied.

We introduce the next assumption of the thermal shell formulation. Let us assume that the thermal conductivity coefficients are distributed through the thickness of the n th layer as follows:

$$k_{ij}^{(n)} = \sum_{i_n} L^{(n)} i_n k_{ij}^{(n) i_n}, \quad \theta_3^{[n-1]} \leq \theta_3 \leq \theta_3^{[n]} \quad (25)$$

that is extensively utilized in this paper, where $k_{ij}^{(n) i_n} = k_{ij}^{(n)} (\theta_3^{(n) i_n})$ are the values of the thermal conductivity tensor on SaS of the n th layer.

For simplicity, we consider the case of linear piezoelectric materials. Therefore, the constitutive equations are expressed as

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}^{(n)} &= C_{ijkl}^{(n)} \varepsilon_{kl}^{(n)} - e_{kij}^{(n)} E_k^{(n)} - \gamma_{ij}^{(n)} \Theta^{(n)}, \\ D_i^{(n)} &= e_{ikl}^{(n)} \varepsilon_{kl}^{(n)} + \epsilon_{ik}^{(n)} E_k^{(n)} + r_i^{(n)} \Theta^{(n)}, \\ \eta^{(n)} &= \gamma_{kl}^{(n)} \varepsilon_{kl}^{(n)} + r_k^{(n)} E_k^{(n)} + \chi^{(n)} \Theta^{(n)}, \end{aligned} \quad (26)$$

where $\sigma_{ij}^{(n)}$ are the stresses of the n th layer; $D_i^{(n)}$ are the electric displacements; $\eta^{(n)}$ is the entropy density; $\Theta^{(n)} = T^{(n)} - T_0$ is the temperature rise; T_0 is the reference temperature; $C_{ijkl}^{(n)}$ are the elastic constants; $e_{kij}^{(n)}$ are the piezoelectric constants; $\gamma_{ij}^{(n)}$ are the thermal stress coefficients; $\epsilon_{ik}^{(n)}$ are the dielectric constants; $r_i^{(n)}$ are the pyroelectric constants; $\chi^{(n)}$ is the entropy-temperature coefficient given by

$$\chi^{(n)} = \rho^{(n)} c_v^{(n)} / T_0, \quad (27)$$

where $\rho^{(n)}$ and $c_v^{(n)}$ are the mass density and the specific heat per unit mass.

Finally, we introduce the last assumption of the SaS thermopiezoelectric shell formulation. Let the material constants be distributed through the thickness of the n th layer as accepted throughout this paper

$$\Xi^{(n)} = \sum_{i_n} L^{(n)} i_n \Xi^{(n) i_n}, \quad \theta_3^{[n-1]} \leq \theta_3 \leq \theta_3^{[n]}, \quad (28)$$

$$\Xi^{(n)} = [C_{ijkl}^{(n)}, e_{ijk}^{(n)}, \gamma_{ij}^{(n)}, \epsilon_{ij}^{(n)}, r_i^{(n)}, \rho^{(n)}, c_v^{(n)}],$$

where $\Xi^{(n) i_n} = \Xi^{(n)} (\theta_3^{(n) i_n})$ are the values of material constants on SaS of the n th layer.

Analytical solution for layered composite cylindrical shell

In this section, we study a layered composite cylindrical shell with embedded piezoelectric layers subjected to thermal and electro-mechanical loads. The boundary conditions for the simply supported cylindrical shell with electrically grounded edges maintained at the reference temperature are written as

$$\Theta^{(n)} = \varphi^{(n)} = \sigma_{11}^{(n)} = u_2^{(n)} = u_3^{(n)} = 0 \quad \text{at } \theta_1 = 0 \text{ and } \theta_1 = L, \quad (29)$$

where θ_1 is the longitudinal coordinate; L is the length of the shell. To satisfy the boundary conditions (29), we search the analytical solution by a method of the double Fourier series expansion

$$\Theta^{(n)i_n} = \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{s=0}^{\infty} \Theta_{rs}^{(n)i_n} \sin \frac{r\pi\theta_1}{L} \cos s\theta_2, \quad (30)$$

$$\varphi^{(n)i_n} = \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{s=0}^{\infty} \varphi_{rs}^{(n)i_n} \sin \frac{r\pi\theta_1}{L} \cos s\theta_2, \quad (31)$$

$$u_1^{(n)i_n} = \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{s=0}^{\infty} u_{1rs}^{(n)i_n} \cos \frac{r\pi\theta_1}{L} \cos s\theta_2, \quad (32)$$

$$u_2^{(n)i_n} = \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{s=0}^{\infty} u_{2rs}^{(n)i_n} \sin \frac{r\pi\theta_1}{L} \sin s\theta_2, \quad (33)$$

$$u_3^{(n)i_n} = \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{s=0}^{\infty} u_{3rs}^{(n)i_n} \sin \frac{r\pi\theta_1}{L} \cos s\theta_2, \quad (34)$$

where θ_2 is the circumferential coordinate; r, s are the wave numbers. The external electromechanical loads are also expanded in double Fourier series.

Substituting formula (30) in a variational equation of the heat conduction theory [18], we obtain the systems of linear algebraic equations in terms of temperatures $\Theta_{rs}^{(n)i_n}$ of order K , where $K = \sum_n I_n - N + 1$. Therefore, the temperatures of SaS can be found using the method of Gaussian elimination. Substituting then (31) – (34) in a variational equation of the thermopiezoelectric shell theory [18], one obtains the systems of linear algebraic equations in terms of $\varphi_{rs}^{(n)i_n}$, $u_{1rs}^{(n)i_n}$, $u_{2rs}^{(n)i_n}$ and $u_{3rs}^{(n)i_n}$ of order $4K$, in which the temperatures of SaS $\Theta_{rs}^{(n)i_n}$ are known. These linear systems are solved again through the method of Gaussian elimination.

The described algorithm was performed with the Symbolic Math Toolbox, which incorporates symbolic computations into the numeric environment of MATLAB. This permits the obtaining of analytical solutions for layered composite cylindrical shells with piezoelectric layers in the framework of the SaS thermoelectroelastic shell formulation, which asymptotically approach the 3D exact solutions of thermopiezoelectricity as the number of SAS of the n th layer I_n tends to infinity.

Numerical examples

We consider a three-layer symmetric cross-ply cylindrical shell with the stacking sequence [90/0/90] composed of the graphite-epoxy composite and covered with two piezoelectric PVDF layers on its bottom and top surfaces. Thus, the hybrid five-layer cylindrical shell [PVDF/90/0/90/PVDF] with ply thicknesses $[3h_0/8h_0/8h_0/8h_0/3h_0]$ is studied, where $h_0 = h/30$. The material properties of the PVDF polarized in the thickness direction are taken to be [14]:

$$E_1 = E_2 = E_3 = 2 \text{ GPa}, \quad \nu_{12} = \nu_{23} = \nu_{31} = 1/3,$$

$$\alpha_{11} = \alpha_{22} = \alpha_{33} = 120 \times 10^{-6} 1/\text{K}, \quad k_{11} = k_{22} = k_{33} = 0.24 \text{ W/mK},$$

$$d_{311} = 3 \times 10^{-12} \text{ m/V}, \quad d_{322} = 23 \times 10^{-12} \text{ m/V}, \quad d_{333} = -30 \times 10^{-12} \text{ m/V},$$

$$\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = 3.078 \times 10^{-11} \text{ F/m}, \quad \epsilon_{33} = 3.141 \times 10^{-11} \text{ F/m}, \quad r_3 = -27 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2\text{K},$$

where E_i are the elastic moduli; ν_{ij} are the Poisson's ratios; α_{ij} are the thermal coefficients of expansion; d_{ijk} are the piezoelectric moduli. The material properties of the graphite-epoxy composite are chosen as follows [15]:

$$\begin{aligned} E_L = 172.5 \text{ GPa}, \quad E_T = 6.9 \text{ GPa}, \quad G_{LT} = 3.45 \text{ GPa}, \quad G_{TT} = 1.38 \text{ GPa}, \quad \nu_{LT} = \nu_{TT} = 0.25, \\ \alpha_L = 0.57 \times 10^{-6} \text{ 1/K}, \quad \alpha_T = 35.6 \times 10^{-6} \text{ 1/K}, \quad k_L = 36.42 \text{ W/mK}, \quad k_T = 0.96 \text{ W/mK}, \\ \epsilon_L = 3.095 \times 10^{-11} \text{ F/m}, \quad \epsilon_T = 2.653 \times 10^{-11} \text{ F/m}, \end{aligned}$$

where L and T denote the fiber and transverse directions. To evaluate the entropy, we accept $\rho = 1780 \text{ kg/m}^3$, $c_v = 1400 \text{ J/kgK}$ and $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$, $c_v = 900 \text{ J/kgK}$ for the PVDF and graphite-epoxy, respectively.

The shell is subjected to sinusoidally distributed temperature loading on the top surface, whereas the bottom surface is maintained at the reference temperature. The bottom and top surfaces are electroded and grounded. Therefore, the boundary conditions can be written as

$$\begin{aligned} \Theta^+ = \Theta_0 \sin \frac{\pi \theta_1}{L}, \quad \varphi^+ = \sigma_{13}^+ = \sigma_{23}^+ = \sigma_{33}^+ = 0, \\ \Theta^- = \varphi^- = \sigma_{13}^- = \sigma_{23}^- = \sigma_{33}^- = 0, \end{aligned} \quad (35)$$

where $\Theta_0 = 1 \text{ K}$ and $T_0 = 293 \text{ K}$. The geometric parameters of the shell are chosen to be $R = 1 \text{ m}$ and $L = 4 \text{ m}$, where R is the radius of the middle surface. It is assumed that the interfaces between the piezoelectric layers and the substrate are electroded and grounded.

To compare the derived results with the 3D exact solution of thermoelectroelasticity [15], we introduce dimensionless variables at crucial points as follows:

$$\begin{aligned} \bar{\Theta} = \Theta(L/2, z) / \Theta_0, \quad \bar{\varphi} = 10^3 d_r \varphi(L/2, z) / h \alpha_r \Theta_0, \\ \bar{u}_1 = 100 u_1(0, z) / R \alpha_r \Theta_0, \quad \bar{u}_3 = 10 u_3(L/2, z) / R \alpha_r \Theta_0, \\ \bar{q}_3 = 100 h q_3(L/2, z) / k_r \Theta_0, \quad \bar{\eta} = 10^{-3} \eta(L/2, z) / E_r \alpha_r^2 \Theta_0, \\ \bar{\sigma}_{13} = 10 S \sigma_{13}(0, z) / E_r \alpha_r \Theta_0, \quad \bar{\sigma}_{33} = 10 S \sigma_{33}(L/2, z) / E_r \alpha_r \Theta_0, \end{aligned}$$

where $z = \theta_3 / h$ is the dimensionless thickness coordinate; $S = R / h$ is the slenderness ratio; $E_r = 6.9 \text{ GPa}$, $\alpha_r = 35.6 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$, $k_r = 36.42 \text{ W/mK}$ and $d_r = 30 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ are the representative moduli of the shell.

Figures 2, 3 display the distributions of the temperature, electric potential, displacements, heat flux, entropy and stresses through the thickness of the hybrid layered cylindrical shell for different values of the slenderness ratio employing seven SaS for each layer. A comparison with the 3D exact solution [15] is also presented. These results demonstrate convincingly the high potential of the developed SaS formulation because the boundary conditions on bottom and top surfaces of the shell for transverse stresses and the continuity conditions for the heat flux and transverse stresses at interfaces are satisfied exactly.

Next, we study a simply supported metal-ceramic cylindrical shell covered with the graphite-epoxy layer and PVDF at the bottom. Therefore, we deal here with a hybrid three-layer shell [PVDF/Graphite-Epoxy/Metal-Ceramic] with ply thicknesses $[0.1h/0.1h/0.8h]$. The fibers of the graphite-epoxy composite are oriented in the axial

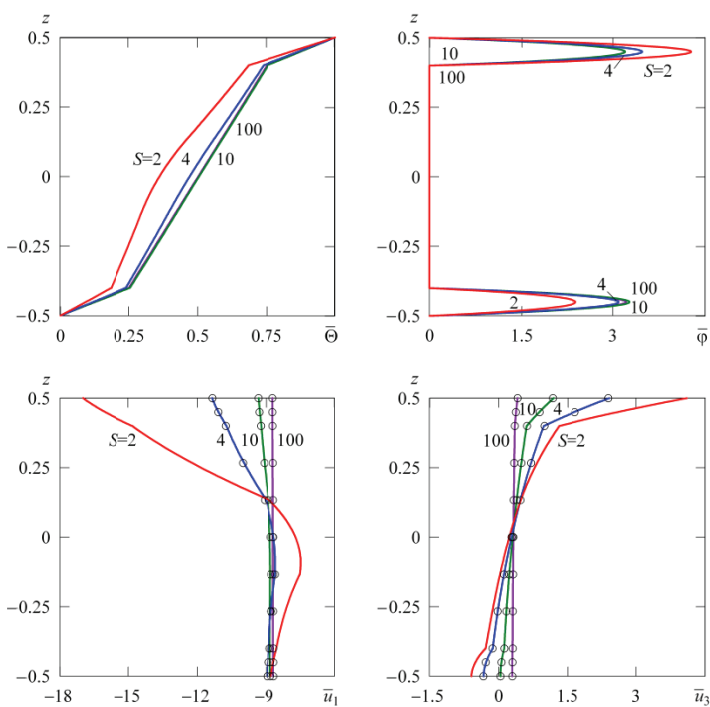


Fig. 2. Through-thickness distributions of the temperature, electric potential and displacements for a hybrid five-layer cylindrical shell: SaS formulation for seven SaS inside each layer and 3D exact solution (○) [15]

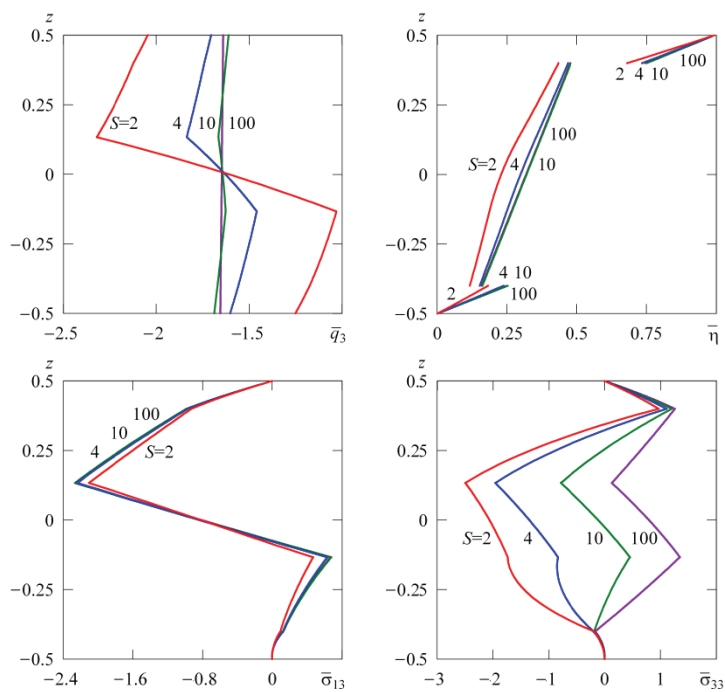


Fig. 3. Through-thickness distributions of the heat flux, entropy and stresses for a hybrid five-layer cylindrical shell: SaS formulation for seven SaS inside each layer

direction. The material properties of the graphite-epoxy and PVDF are presented in a previous example. The metal-ceramic shell is made of the two-phase composite. The metal phase is aluminum with $E_m = 7 \times 10^{10}$ Pa, $\nu_m = 0.3$, $\alpha_m = 23.4 \times 10^{-6}$ 1/K, $k_m = 233$ W/mK, $\rho_m = 2707$ kg/m³ and $c_m = 896$ J/kgK; the thermal barrier is a SiC ceramic with $E_c = 38 \times 10^{10}$ Pa, $\nu_c = 0.17$, $\alpha_c = 4.3 \times 10^{-6}$ 1/K, $k_c = 65$ W/mK, $\rho_c = 3100$ kg/m³ and $c_c = 670$ J/kgK. It is assumed that the material properties are varied through the thickness according to the rule of mixtures:

$$\begin{aligned} E &= E_m V_m + E_c V_c, \quad \nu = \nu_m V_m + \nu_c V_c, \quad \alpha = \alpha_m V_m + \alpha_c V_c, \\ k &= k_m V_m + k_c V_c, \quad \rho c = \rho_m c_m V_m + \rho_c c_c V_c, \end{aligned} \quad (36)$$

where V_m and V_c are the volume fractions of metal and ceramic phases defined as

$$V_m = 1 - V_c, \quad V_c = [(z + 0.3)/0.8]^\gamma, \quad z \in [-0.3, 0.5], \quad (37)$$

where γ is the material gradient index; $z = \theta_3/h$ is the dimensionless thickness coordinate.

Here, we study a cylindrical shell subjected to sinusoidally distributed temperature loading on the top surface and consider the following boundary conditions:

$$\begin{aligned} \Theta^+ &= \Theta_0 \sin \frac{\pi \theta_1}{L} \cos 2\theta_2, \quad \varphi^+ = \sigma_{13}^+ = \sigma_{23}^+ = \sigma_{33}^+ = 0, \\ \Theta^- &= 0, \quad D_3^- = \sigma_{13}^- = \sigma_{23}^- = \sigma_{33}^- = 0, \end{aligned} \quad (38)$$

where $\Theta_0 = 1$ K and $T_0 = 293$ K. The interface between PVDF and graphite-epoxy is electroded and grounded.

To analyze the obtained results efficiently, we introduce dimensionless variables at crucial points as functions of the dimensionless thickness coordinate $z = \theta_3/h$ as

$$\begin{aligned} \bar{\Theta} &= \Theta(L/2, 0, z)/\Theta_0, \quad \bar{\varphi} = d_r \varphi(L/2, 0, z)/h \alpha_r \Theta_0, \\ \bar{u}_1 &= 10^{-4} u_1(0, 0, z)/R \alpha_r \Theta_0, \quad \bar{u}_3 = 10^{-5} u_3(L/2, 0, z)/R \alpha_r \Theta_0, \\ \bar{\sigma}_{11} &= 10^{-5} \sigma_{11}(L/2, 0, z)/E_r \alpha_r \Theta_0, \quad \bar{\sigma}_{22} = 10^{-5} \sigma_{22}(L/2, 0, z)/E_r \alpha_r \Theta_0, \\ \bar{\sigma}_{12} &= 10^{-4} S \sigma_{12}(0, \pi/4, z)/E_r \alpha_r \Theta_0, \quad \bar{\sigma}_{13} = 10^{-3} S \sigma_{13}(0, 0, z)/E_r \alpha_r \Theta_0, \\ \bar{\sigma}_{23} &= 10^{-3} S \sigma_{23}(L/2, \pi/4, z)/E_r \alpha_r \Theta_0, \quad \bar{\sigma}_{33} = 10^{-3} S \sigma_{33}(L/2, 0, z)/E_r \alpha_r \Theta_0, \quad S = R/h, \end{aligned}$$

where E_r and α_r are the representative moduli taken from a previous example. The geometric parameters of the shell are chosen as $R = 1$ m and $L = 4$ m.

Figures 4, 5 show the through-thickness distributions of the temperature, electric potential, displacements and stresses for different values of the slenderness ratio S and material gradient index $\gamma = 2$ using 13 SaS for each layer. These results demonstrate again the high potential of the developed SaS shell formulation, since the boundary conditions on the bottom and top surfaces and the continuity conditions at the interfaces for transverse stresses are satisfied properly.

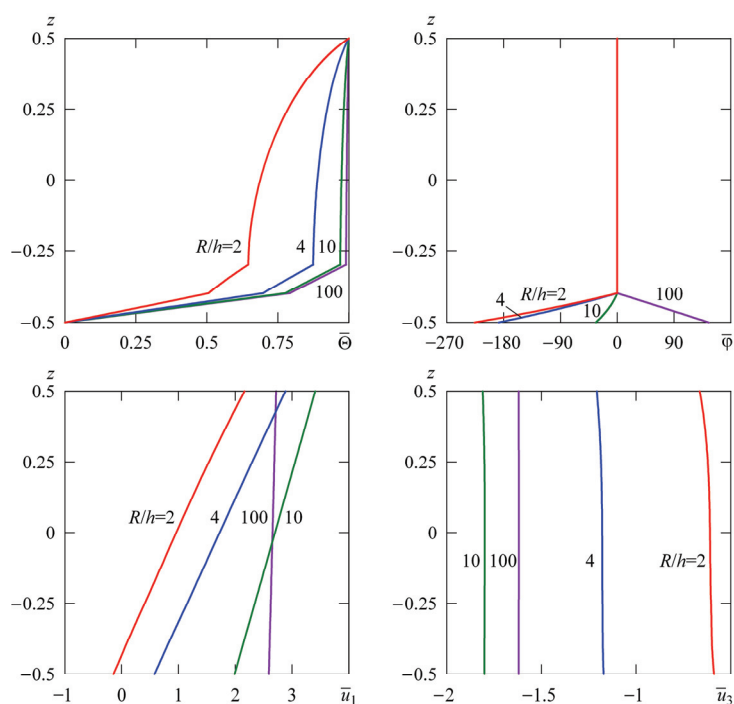


Fig. 4. Through-thickness distributions of the temperature, electric potential and displacements for a hybrid three-layer cylindrical shell: SaS formulation for $\gamma = 2$ and 13 SaS inside each layer

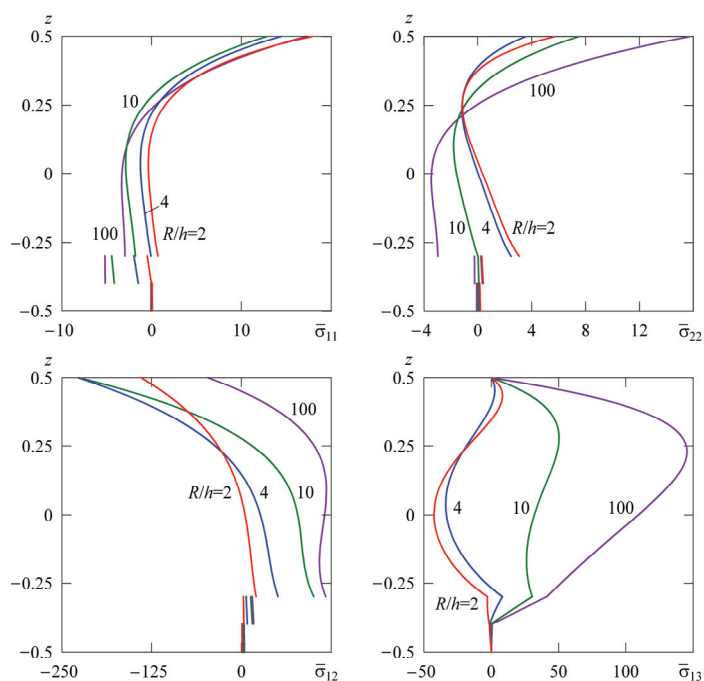


Fig. 5. Through-thickness distributions of stresses for a hybrid three-layer cylindrical shell: SaS formulation for $\gamma = 2$ and 13 SaS inside each layer (continued p. 317)

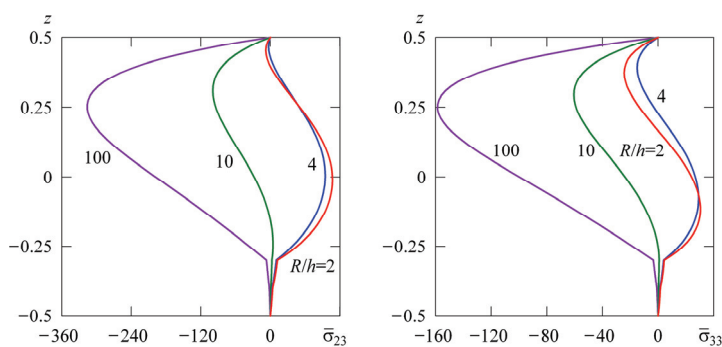


Fig. 5. Through-thickness distributions of stresses for a hybrid three-layer cylindrical shell: SaS formulation for $\gamma = 2$ and 13 SaS inside each layer

Conclusions

A robust SaS formulation for the coupled steady-state thermal stress analysis of layered piezoelectric shells has been proposed. It is based on a concept of SaS located at Chebyshev polynomial nodes throughout the layers and interfaces as well. As a result, the developed SaS formulation makes it possible to obtain the Ritz solutions for hybrid layered cylindrical shells with piezoelectric sensors and actuators with a prescribed accuracy, which can asymptotically approach the 3D exact solutions of thermopiezoelectricity as the number of SaS goes to infinity.

This work was supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 18-19-00092).

References

1. Wu C.P., Chiu K.H., Wang Y.M. A review on the three-dimensional analytical approaches of multilayered and functionally graded piezoelectric plates and shells, *Computers, Materials & Continua*, 2008, vol. 8, pp. 93-132.
2. Wu C.P., Liu Y.C. A review of semi-analytical numerical methods for laminated composite and multilayered functionally graded elastic/piezoelectric plates and shells, *Composite Structures*, 2016, vol. 147, pp. 1-15.
3. Dube G.P., Kapuria S., Dumir P.C. Exact piezothermoelastic solution of simply-supported orthotropic flat panel in cylindrical bending, *International Journal of Mechanical Sciences*, 1996, vol. 38, pp. 1161-1177.
4. Shang F., Wang Z., Li Z. Analysis of thermally induced cylindrical flexure of laminated plates with piezoelectric layers, *Composites Part B: Engineering*, 1997, vol. 28, pp. 185-193.
5. Ootao Y., Tanigawa Y. Three-dimensional transient piezothermoelasticity for a rectangular composite plate composed of cross-ply and piezoelectric laminae, *International Journal of Engineering Science*, 2000, vol. 38, pp. 47-71.
6. Zhang C., Di S., Zhang N. A new procedure for static analysis of thermoelectric laminated composite plates under cylindrical bending, *Composite Structures*, 2002, vol. 56, pp. 131-140.
7. Zhang C., Cheung Y.K., Di S., Zhang N. The exact solution of coupled thermoelectroelastic behavior of piezoelectric laminates, *Composite Structures*, 2002, vol. 80, pp. 1201-1212.
8. Xu K., Noor A.K., Tang Y.Y. Three-dimensional solutions for coupled thermoelectroelastic response of multilayered plates, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1995, vol. 126, pp. 355-371.

9. Tarn J.Q. A state space formalism for piezothermoelasticity, *International Journal of Solids and Structures*, 2002, vol. 39, pp. 5173-5184.
10. Tarn J.Q., Chang H.H. A refined state space formalism for piezothermoelasticity, *International Journal of Solids and Structures*, 2008, vol. 45, pp. 3021-3032.
11. Vel S.S., Batra R.C. Generalized plane strain thermopiezoelectric analysis of multilayered plates, *Journal of Thermal Stresses*, 2003, vol. 26, pp. 353-377.
12. Zhong Z., Shang E.T. Exact analysis of simply supported functionally graded piezothermoelectric plates, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2005, vol. 16, pp. 643-651.
13. Xu K., Noor A.K. Three-dimensional analytical solutions for coupled thermoelectroelastic response of multilayered cylindrical shells, *AIAA Journal*, 1996, vol. 34, pp. 802-810.
14. Kapuria S., Dumir P.C., Sengupta S. An exact axisymmetric solution for a simply supported piezoelectric cylindrical shell, *Archive of Applied Mechanics*, 1997, vol. 67, pp. 260-273.
15. Kapuria S., Sengupta S., Dumir P.C. Three-dimensional solution for a hybrid cylindrical shell under axisymmetric thermoelectric load, *Archive of Applied Mechanics*, 1997, vol. 67, pp. 320-330.
16. Cheng Z.Q., Batra R.C. Three-dimensional asymptotic scheme for piezothermoelastic laminates, *Journal of Thermal Stresses*, 2000, vol. 23, pp. 95-110.
17. Kulikov G.M., Plotnikova S.V. Exact 3D thermoelectroelastic analysis of piezoelectric plates through a sampling surfaces method, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2015, vol. 22, pp. 33-43.
18. Kulikov G.M., Mamontov A.A., Plotnikova S.V. Coupled thermoelectroelastic stress analysis of piezoelectric shells, *Composite Structures*, 2015, vol. 124, pp. 65-76.
19. Kulikov G.M., Plotnikova S.V. An analytical approach to three-dimensional coupled thermoelectroelastic analysis of functionally graded piezoelectric plates, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2017, vol. 28, pp. 435-450.
20. Kulikov G.M., Plotnikova S.V. Advanced formulation for laminated composite shells: 3D stress analysis and rigid-body motions, *Composite Structures*, 2013, vol. 95, pp. 236-246.
21. Kulikov G.M. Refined global approximation theory of multilayered plates and shells, *Journal of Engineering Mechanics*, 2001, vol. 127, pp. 119-125.
22. Kulikov G.M., Carrera E. Finite deformation higher-order shell models and rigid-body motions, *International Journal of Solids and Structures*, 2008, vol. 45, pp. 3153-3172.
23. Kulikov G.M., Plotnikova S.V. Solution of static problems for a three-dimensional elastic shell, *Doklady Physics*, 2011, vol. 56, no. 8, pp. 448-451.
24. Burden R.L., Faires J.D. *Numerical Analysis*, (9th Edition), Brooks/Cole, Cengage Learning, Boston, USA, 2010, 872 p.
25. Kulikov G.M., Plotnikova S.V. [Solution of three-dimensional problems of thermoelasticity for laminated shells made of functionally graded materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 1, pp. 185-190. (In Russ., abstract in Eng.)
26. Kulikov G.M., Carrera E., Plotnikova S.V. Hybrid-mixed quadrilateral element for laminated plates composed of functionally graded materials, *Advanced Materials & Technologies*, 2017, no. 1, pp. 44-55. doi: 10.17277/amt.2017.01.pp.044-055

Связанный термоэлектромеханический анализ гибридных слоистых цилиндрических оболочек с пьезоэлектрическими сенсорами и актуаторами

Г. М. Куликов, Н. П. Меркушева, М. Г. Куликов, С. В. Плотникова

*Научно-исследовательская лаборатория «Механика интеллектуальных материалов и конструкций», gmkulikov@mail.ru;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: слоистая пьезоэлектрическая оболочка, термопьезоэлектричество, трехмерный анализ напряжений, метод отсчетных поверхностей.

Аннотация: Данная статья посвящена реализации метода отсчетных поверхностей (SaS метод) для решения трехмерных связанных задач для слоистых пьезоэлектрических оболочек, подверженных температурным и электромеханическим воздействиям. SaS метод основан на выборе внутри n -го слоя I_n отсчетных поверхностей параллельных срединной поверхности, чтобы ввести температуры, электрические потенциалы и перемещения этих поверхностей в качестве искоемых функций. Такой выбор неизвестных с последующим использованием полиномов Лагранжа степени $I_n - 1$ в аппроксимациях температуры, электрического потенциала, перемещений и механических параметров материала по толщине слоя приводит к эффективной модели термопьезоэлектрической оболочки. Внутренние SaS расположены внутри каждого слоя в узловых точках полинома Чебышева, что позволяет равномерно минимизировать погрешность приближения полиномами Лагранжа высокого порядка. В результате SaS метод может быть применен к построению аналитических решений для гибридных слоистых цилиндрических оболочек с пьезоэлектрическими сенсорами и актуаторами, которые асимптотически приближаются к точным решениям термопьезоэлектричества при стремлении числа отсчетных поверхностей I_n к бесконечности.

Список литературы

1. Wu, C. P. A review on the three-dimensional analytical approaches of multilayered and functionally graded piezoelectric plates and shells / C. P. Wu, K. H. Chiu, Y. M. Wang // Computers, Materials & Continua. – 2008. – Vol. 8. – P. 93 – 132.
2. Wu, C. P. A review of semi-analytical numerical methods for laminated composite and multilayered functionally graded elastic/piezoelectric plates and shells / C. P. Wu, Y. C. Liu // Composite Structures. – 2016. – Vol. 147. – P. 1 – 15.
3. Dube, G. P. Exact piezothermoelastic solution of simply-supported orthotropic flat panel in cylindrical bending / G. P. Dube, S. Kapuria, P. C. Dumir // International Journal of Mechanical Sciences. – 1996. – Vol. 38. – P. 1161 – 1177.
4. Shang, F. Analysis of thermally induced cylindrical flexure of laminated plates with piezoelectric layers / F. Shang, Z. Wang, Z. Li // Composites Part B: Engineering. – 1997. – Vol. 28. – P. 185 – 193.
5. Ootao, Y. Three-dimensional transient piezothermoelasticity for a rectangular composite plate composed of cross-ply and piezoelectric laminae / Y. Ootao, Y. Tanigawa // International Journal of Engineering Science. – 2000. – Vol. 38. – P. 47 – 71.
6. Zhang, C. A new procedure for static analysis of thermo-electric laminated composite plates under cylindrical bending / C. Zhang, S. Di, N. Zhang // Composite Structures. – 2002. – Vol. 56. – P. 131 – 140.

7. Zhang, C. The exact solution of coupled thermoelectroelastic behavior of piezoelectric laminates / C. Zhang, Y. K. Cheung, S. Di, N. Zhang // *Composite Structures*. – 2002. – Vol. 80. – P. 1201 – 1212.
8. Xu, K. Three-dimensional solutions for coupled thermoelectroelastic response of multilayered plates / K. Xu, A. K. Noor, Y. Y. Tang // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 1995. – Vol. 126. – P. 355 – 371.
9. Tarn, J. Q. A state space formalism for piezothermoelasticity / J. Q. Tarn // *International Journal of Solids and Structures*. – 2002. – Vol. 39. – P. 5173 – 5184.
10. Tarn, J. Q. A refined state space formalism for piezothermoelasticity / J. Q. Tarn, H. H. Chang // *International Journal of Solids and Structures*. – 2008. – Vol. 45. – P. 3021 – 3032.
11. Vel, S. S. Generalized plane strain thermopiezoelectric analysis of multilayered plates / S. S. Vel, R. C. Batra // *Journal of Thermal Stresses*. – 2003. – Vol. 26. – P. 353 – 377.
12. Zhong, Z. Exact analysis of simply supported functionally graded piezothermoelectric plates / Z. Zhong, E. T. Shang // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. – 2005. – Vol. 16. – P. 643 – 651.
13. Xu, K. Three-dimensional analytical solutions for coupled thermoelectroelastic response of multilayered cylindrical shells / K. Xu, A. K. Noor // *AIAA Journal*. – 1996. – Vol. 34. – P. 802 – 810.
14. Kapuria, S. An exact axisymmetric solution for a simply supported piezoelectric cylindrical shell / S. Kapuria, P. C. Dumir, S. Sengupta // *Archive of Applied Mechanics*. – 1997. – Vol. 67. – P. 260 – 273.
15. Kapuria, S. Three-dimensional solution for a hybrid cylindrical shell under axisymmetric thermoelectric load / S. Kapuria, S. Sengupta, P. C. Dumir // *Archive of Applied Mechanics*. – 1997. – Vol. 67. – P. 320 – 330.
16. Cheng, Z. Q. Three-dimensional asymptotic scheme for piezothermoelastic laminates / Z. Q. Cheng, R. C. Batra // *Journal of Thermal Stresses*. – 2000. – Vol. 23. – P. 95 – 110.
17. Kulikov, G. M. Exact 3D thermoelectroelastic analysis of piezoelectric plates through a sampling surfaces method / G. M. Kulikov, S. V. Plotnikova // *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. – 2015. – Vol. 22. – P. 33 – 43.
18. Kulikov, G. M. Coupled thermoelectroelastic stress analysis of piezoelectric shells / G. M. Kulikov, A. A. Mamontov, S. V. Plotnikova // *Composite Structures*. – 2015. – Vol. 124. – P. 65 – 76.
19. Kulikov, G. M. An analytical approach to three-dimensional coupled thermoelectroelastic analysis of functionally graded piezoelectric plates / G. M. Kulikov, S. V. Plotnikova // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. – 2017. – Vol. 28. – P. 435 – 450.
20. Kulikov, G. M. Advanced formulation for laminated composite shells: 3D stress analysis and rigid-body motions / G. M. Kulikov, S. V. Plotnikova // *Composite Structures*. – 2013. – Vol. 95. – P. 236 – 246.
21. Kulikov, G. M. Refined global approximation theory of multilayered plates and shells / G. M. Kulikov // *Journal of Engineering Mechanics*. – 2001. – Vol. 127. – P. 119 – 125.
22. Kulikov, G. M. Finite deformation higher-order shell models and rigid-body motions / G. M. Kulikov, E. Carrera // *International Journal of Solids and Structures*. – 2008. – Vol. 45. – P. 3153 – 3172.
23. Куликов, Г.М. Решение задачи статики для упругой оболочки в пространственной постановке / Г. М. Куликов, С.В. Плотникова // *Докл. академии наук*. – 2011. – Т. 439, № 5. – С. 613 – 616.

24. Burden, R. L. Numerical Analysis / R. L. Burden, J. D. Faires. – 9th Edition. – Brooks/Cole, Cengage Learning, Boston, USA, 2010. – 872 p.

25. Куликов Г. М. Решение трехмерных задач термоупругости для слоистых оболочек из функциональных материалов / Г. М. Куликов, С. В. Плотникова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 1. – С. 185 – 190.

26. Kulikov, G. M. Hybrid-mixed quadrilateral element for laminated plates composed of functionally graded materials / G. M. Kulikov, E. Carrera, S. V. Plotnikova // Advanced Materials & Technologies. – 2017. – No. 1. – P. 44 – 55. doi: 10.17277/amt.2017.01.pp.044-055

Verwandte thermoelektromechanische Analyse von Hybrid-Zylinderschalen mit piezoelektrischen Sensoren und Aktuatoren

Zusammenfassung: Dieser Artikel befasst sich mit der Implementierung der Referenzoberflächenmethode (SaS-Methode) zur Lösung dreidimensional gekoppelter Probleme für geschichtete piezoelektrische Schalen, die Temperatur- und elektromechanischen Effekten ausgesetzt sind. Das SaS-Verfahren basiert auf der Auswahl von Bezugsflächen parallel zur mittleren Oberfläche innerhalb der n -ten Schicht I_n , um Temperaturen, elektrische Potentiale und Verschiebungen dieser Oberflächen als gewünschte Funktionen einzuführen. Eine solche Auswahl von Unbekannten mit der anschließenden Verwendung von Lagrange-Polynomen des Grades $I_n - 1$ in Approximationen von Temperatur, elektrischem Potential, Verschiebungen und mechanischen Parametern des Materials über die Schichtdicke führt zu einem effektiven Modell einer thermopiezoelektrischen Hülle. Interne SaS befinden sich in jeder Schicht an den Knotenpunkten des Chebyshev-Polynoms, wodurch der Approximationsfehler von Lagrange-Polynomen hoher Ordnung gleichmäßig minimiert werden kann. Infolgedessen kann die SaS-Methode auf die Konstruktion von analytischen Lösungen für Hybridschicht-Zylinderschalen mit piezoelektrischen Sensoren und Aktuatoren angewendet werden, die sich asymptotisch den exakten Lösungen der Thermo-Piezoelektrizität nähern, wenn die Anzahl der Bezugsflächen I_n gegen unendlich tendiert.

Analyse associée thermoélectromécanique des coques cylindriques en couches hybrides avec capteurs et actionneurs piézoélectriques

Résumé: L'article est consacré à la mise en œuvre de la méthode SaS pour résoudre des problèmes liés 3D pour des couches piézoélectriques soumises à des influences thermiques et électromécaniques. La méthode SaS est basée sur la sélection à l'intérieur de la n ème couche de surfaces de référence parallèles à la surface médiane pour introduire des températures, des potentiels électriques et le déplacement de ces surfaces en qualité des fonctions souhaitées. Un tel choix d'inconnues, suivie de l'utilisation des polynômes de Lagrange de degré dans les approximations de la température, du potentiel électrique, des déplacements et des paramètres mécaniques du matériau sur l'épaisseur de la couche, aboutit à un modèle efficace de la coque thermopiezoelectrique. Les SaS internes sont situés à l'intérieur de chaque couche aux points nodaux du polynôme de Chebyshev, ce qui permet de minimiser uniformément

l'erreur d'approximation des polynômes de Lagrange d'ordre élevé. En conséquence, la méthode SaS peut être appliquée à la construction de solutions analytiques pour des coques cylindriques en couches hybrides avec des capteurs piézoélectriques et des actuateurs qui se rapprochent asymptotiquement des solutions précises de thermopyzélectricité tout en cherchant le nombre de surfaces de référence à l'infini.

Авторы: *Куликов Геннадий Михайлович* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Механика интеллектуальных материалов и конструкций»; *Меркушева Наталия Павловна* – инженер научно-исследовательской лаборатории «Механика интеллектуальных материалов и конструкций»; *Куликов Михаил Геннадьевич* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Механика интеллектуальных материалов и конструкций»; *Плотникова Светлана Валерьевна* – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Механика интеллектуальных материалов и конструкций», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Нахман Александр Давидович* – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ СЛОЯ НАНОДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА И ИХ УЧЕТ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А. А. Попова, И. Н. Шубин

*Кафедра «Техника и технологии производства наноматериалов»,
alyona.popova.93@list.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: оборудование; поведение нанодисперсного материала; расчет технологических параметров; углеродный наноматериал.

Аннотация: Рассмотрены особенности поведения нанодисперсного слоя и отдельных наночастиц применительно к процессам подачи из бункера с наложением вибрации, его движения по направляющей лопасти и ссыпания потока в приемную емкость. Аналогия поведения потоков традиционных дисперсных материалов, например, порошков и промышленных пылей, и нанодисперсных позволили выделить основные стадии при его движении. Установлено, что коэффициент разрыхления потока при падении нанодисперсного материала прямо пропорционален высоте слоя и скорости наночастиц. Сформулированы зависимости и даны рекомендации по проектированию бункерного узла, используемого в технологическом оборудовании для обработки нанодисперсных материалов.

Введение

Сегодня нанотехнологии плавно переходят из разряда фундаментальных и теоретических исследований, лабораторных образцов в разряд опытно-промышленного и серийного производства, подразумевающего стабильное качество продукции – будь то непосредственно углеродные материалы (**УНМ**) или оборудование для их получения или обработки. При этом на первое место часто выходят не сами УНМ, а именно аппаратурно-технологическое оформление процесса производства, обеспечивающее гарантированные характеристики получаемого конструкционного или функционального наноматериала [1 – 3]. Переход к нанодисперсным материалам с характерными размерами частиц $\sim 10 \dots 100$ нм позволяет добиться как существенного улучшения существующих свойств, так и получение принципиально новых, что обусловлено изменением характеристик материалов при достижении нанометрового размера частиц [4 – 6].

Медицина и фармакология, производство сорбентов, полимеров и строительных материалов, порошковая металлургия – это лишь небольшой перечень областей, где востребованы знания о свойствах нанодисперсного материала (**НДМ**), состоящего из сплошной среды газа или жидкости и дисперсных наночастиц НДМ, и особенностях технологического оборудования при их применении, с учетом масштабирования и реальных условий производства [1, 6, 7].

Исследованию характеристик НДМ посвящено большое количество работ, авторы которых отмечают полную аналогию его свойств с дисперсными сыпучими материалами, в том числе порошками и промышленными пылями [5, 8 – 12]. Так, например, в работе [13] рассмотрено влияние электростатических свойств НДМ на процесс переработки, общие физико-механические характеристики отдельных наночастиц, законы их движения рассмотрены в работе [14]. Во всех работах рассматриваются лишь отдельные характеристики НДМ применительно к лабораторным исследованиям и не учитываются все их параметры, а также условия использования и расчета оборудования, то есть отсутствуют работы, посвященные практическому использованию [15 – 17].

Цель работы – попытка применить классические подходы к расчетам и конструированию технологического оборудования для наноиндустрии, как наиболее динамично развивающейся области инновационных материалов и технологий.

Моделирование поведения НДМ при расчете типового оборудования

Рассмотрим конструкцию устройства узла подачи нанодисперсной системы, состоящую из бункера, виброднища и наклонной лопасти, и проведем оптимизационный синтез, состоящий в сочетании отдельных узлов, каждый из которых обеспечивает определенное состояние слоя наночастиц. В качестве допущений приняты следующие этапы состояния НДМ: в бункере – неподвижный слой (наночастицы в постоянном контакте друг с другом); на виброднище – наночастицы в виброоживленном слое (хаотическое перемещение наночастиц); на наклонной лопасти – в скатывающемся слое (упорядоченное слоистое движение); отрыв от края лопасти и падение наночастиц в веере – свободное одночастичное движение (до завала). Этапы движения НДМ подробнее рассмотрим на примере одного бункерного устройства (рис. 1).

На первом этапе подачи НДМ 1 происходит его истечение из бункера 2 на направляющую лопасть 4 по виброднищу 3. В данном случае виброднище 4 применяется для выравнивания скорости истечения и разрушения сводообразования. Представим виброднище как пластину (рис. 2), совершающую колебания с частотой ω и амплитудой A в направлении, образующем угол β с вертикальной осью [5, 18]. На наночастицу массой m действуют сила тяжести $P = mg$, сила трения о поверхность пластины $F_{\text{тр}}$, нормальная реакция поверхности N , а также сила инерции I . Если НДМ поступает на виброднище, но не отрывается от него, то его ускорение относительно данной поверхности $\ddot{y} = 0$. Исследования [18 – 21] показали, что свойства слоя нанодисперсной системы при вибрационном воздействии существенно изменяются с началом отрыва наночастиц друг от друга

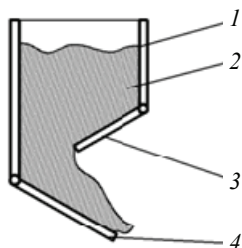


Рис. 1. Схема движения НДМ при истечении из бункерного устройства:
1 – НДМ; 2 – бункер; 3 – виброднище;
4 – направляющая лопасть

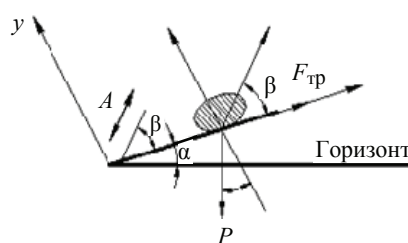


Рис. 2. Схема действия сил на наночастицу при наложении вибрации

и от вибрирующей поверхности, на которой они находятся. До начала отрыва НДМ ожижается на вибрирующей поверхности. После наступления отрыва – при увеличении интенсивности колебаний – начинается произвольное перемещение НДМ, слой как бы «вскипает», то есть увеличивается его порозность. Наночастицы материала отрываются от виброднища, когда нормальная реакция $N = 0$. Тогда, согласно последнему уравнению, получим

$$A_{\text{кр}} \omega_{\text{кр}}^2 = \frac{g}{\sin(\omega\tau)} \frac{\cos\alpha}{\sin\beta}, \quad (1)$$

где $A_{\text{кр}}$ – критическая амплитуда, м; $\omega_{\text{кр}}$ – циклическая частота, рад/с; g – ускорение свободного падения, м/с².

Из выражения (1) видно, что минимальное критическое ускорение вибрации виброднища, при котором произойдет отрыв наночастицы, будет при $\sin(\omega\tau) = \pm 1$. В эти моменты относительное критическое ускорение вибрации определяется по формуле

$$\frac{A_{\text{кр}} \omega_{\text{кр}}^2 \sin\beta}{g \cos\alpha} = \pm 1. \quad (2)$$

Для нанодисперсной системы, подвергаемой вибрационному воздействию, переход слоя материала к виброожижению зависит не от массы наночастиц, а от ускорения вибрации $A\omega$ виброднища. Это дает возможность, регулируя амплитуду и частоту вибратора, управлять виброожижением и соответственно порозностью в пограничном слое материала.

Таким образом, принимая во внимание действие массы НДМ, неучтенное при рассмотрении движения наночастицы по виброднищу, необходимо ввести ряд граничных условий (допущений):

- 1) НДМ не отрывается от вибрирующей поверхности (при соблюдении условия $N > 0$);
- 2) ожижение пограничного слоя наночастиц управляемо;
- 3) происходит разрушение сводообразования в объеме потока;
- 4) порозность в объеме НДМ остается постоянной, так как ее увеличение (ожижение наночастиц в пограничном слое вдоль виброднища) компенсируется уплотнением лежащего выше слоя за счет вибрации.

Определение скорости истечения материала из бункера

Из рассмотренного выше видно, что вибрация будет влиять на расход косвенно, то есть она будет лишь «выравнивать» скорость истечения, делая расход стабильным. Тогда

$$v = \lambda \sqrt{3,2gR}, \quad (3)$$

где R – гидравлический радиус отверстия (щели) истечения, $R = F_{\text{тр}}/L$, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; λ – коэффициент истечения; L – периметр отверстия, м.

Можно утверждать, что определяющими при смешивании будут стадии со второй по четвертую, так как на первой стадии материал, вытекающий из бункера на направляющую, не влияет прямо на приготовление смеси.

Определение характеристик потока сыпучего материала при движении по направляющей пластине

На втором этапе движения НДМ поступает с виброднища на направляющую лопасть. Уравнение равновесия для НДМ, движущегося под углом α к горизонту, имеет вид

$$\ddot{x}m + F_{\text{тр}}mg \cos \alpha - mg \sin \alpha = 0, \quad (4)$$

где $\ddot{x}$ – ускорение движения наночастицы.

Откуда

$$\ddot{x} = F_{\text{тр}}mg \cos \alpha - mg \sin \alpha. \quad (5)$$

Последовательно интегрируя уравнение (5), получаем выражение для определения скорости движения НДМ и пройденного им пути

$$\dot{x} = (g \sin \alpha - F_{\text{тр}} \cos \alpha) \tau + c_1 \quad (6)$$

при граничных условиях

$$\dot{x} = v_0, \tau = 0, \Rightarrow c_1 = v_0; , \quad (7)$$

$$\dot{x} = v_0 + g(\sin \alpha - f \cos \alpha) \tau. \quad (8)$$

Далее запишем уравнение пройденного пути по направляющей лопасти, проинтегрировав уравнение (8), $x = v_0 \tau + \frac{1}{2} g(\sin \alpha - f \cos \alpha) \tau^2 + c_2$.

При постоянной интегрирования при начальных условиях $c_2 = 0$; $\tau = 0$; $x = 0$ уравнение примет вид

$$x = v_0 \tau + \frac{1}{2} g(\sin \alpha - f \cos \alpha) \tau^2. \quad (9)$$

Определение коэффициента разрыхления в движущемся слое материала

Нанодисперсный материал, находясь в скатывающемся слое на направляющей лопасти, увеличивает порозность. Степень разрыхления можно охарактеризовать коэффициентом разрыхления K . Коэффициент расширения является важной переменной, характеризующей отношение элементарных объемов НДМ в бункере и в потоке, движущемся вдоль направляющей лопасти. Для получения данной величины необходимо определить среднюю скорость потока $\dot{x}_{\text{ср}}$

$$\dot{x}_{\text{ср}} = \frac{\int_0^L \dot{x} \partial Q}{\sum Q}, \quad (10)$$

где $\dot{x}$ – функция скорости наночастиц потока в зависимости от пройденного пути; ∂Q – количество материала на направляющей лопасти.

Анализируя зависимость (10) для средней скорости и упростив его, запишем

$$\dot{x}_{\text{ср}} = v'_{\text{ср}} = \frac{L_{\text{иср}}}{\tau_{\text{иср}}}, \quad (11)$$

где $L_{\text{иср}}$ – средний путь, пройденный i -й наночастицей вдоль лопасти, м; $\tau_{\text{иср}}$ – среднее время затраченное i -й наночастицей на прохождение пути, с.

Коэффициент разрыхления потока НДС, движущегося по лопасти, находим по уравнению

$$K = \frac{v'_{cp} h_L}{S_\tau}, \quad (12)$$

где h_L – толщина потока на краю ссыпания с лопасти, м; S_τ – площадь нанодисперсного слоя (НДС), выходящая на линию ссыпания, за время прохождения наночастицами длины, м².

Теоретическое исследование движения нанодисперсного материала

На третьей стадии движения материала – свободном падении с направляющей – необходимо рассмотреть ряд моментов. Для определения общих закономерностей движения рассмотрим качественную картину движения материала. В работах [20, 21] доказано, что траектория падения частицы зависит от ее скорости в момент отрыва от направляющей и имеет параболический вид. Анализ результатов экспериментов позволяет сделать предположение о том, что в процессе падения с направляющей частицы материала практически не соударяются друг с другом. Вследствие того, что скорость частиц материала в момент отрыва от направляющей определяется их положением на ней, естественно предположить, что и траектория падения отдельных частиц определяется тем же. При падении с направляющей сыпучий материал разрыхляется. Доказательством этого является тот факт, что ширина веера ссыпающегося с направляющей материала увеличивается, по мере удаления от ссыпающегося края, в то же время количественный расход материала через любое горизонтальное сечение в веере остается постоянным.

На третьем этапе движения НДМ наступает свободное падение с направляющей лопасти. Для анализа этого движения необходимо ввести допущения, подтвержденные в ряде работ [20 – 22]:

1. Наночастицы ссыпаются с направляющей потоком, состоящим из ряда подслоев, толщина которых определяется средним размером наночастиц.
2. В момент отрыва от направляющей наночастицы, находящиеся в одном подслое, имеют одинаковые скорости.
3. Скорость наночастицы в момент отрыва увеличивается по толщине потока, по мере удаления от ссыпающегося края направляющей лопасти.

Границы веера НДМ, ссыпающегося с направляющей плоскости

Движение наночастицы в свободном падении после отрыва от направляющей лопасти можно рассматривать как движение тела в гравитационном поле с некоторой начальной скоростью. Уравнение траектории движения i -й наночастицы определяется по формулам:

$$x = -h_i \sin \alpha - v_i \tau \cos \alpha; \quad (13)$$

$$y = h_i \cos \alpha - v_i \tau \sin \alpha - \frac{g \tau^2}{2}, \quad (14)$$

где x, y – текущие координаты движущейся наночастицы; h_i – расстояние между наночастицей и ссыпавшим краем направляющей лопасти при отрыве, в направлении, нормальном вектору скорости частиц, м; α – угол между вектором скорости v_i и горизонталью; τ – текущее время с момента отрыва частицы от направляющей лопасти, с.

Как отмечалось ранее, нанодисперсный слой, движущийся по направляющей лопасти, имеет сечение слоя, близкое к прямоугольному. Для частицы, находящейся на нижней границе слоя, $h_i = 0$ и $v_i = v_n$. Нижняя граница веера падения наночастиц описывается уравнениями:

$$x = v_n \tau \cos \alpha ; \quad (15)$$

$$y = v_n \tau \sin \alpha + \frac{g \tau^2}{2} . \quad (16)$$

Для частицы, движущейся по верхней границе слоя, $h_i = h$ и $v_i = v_b$. Верхняя граница веера представлена уравнениями:

$$x = -h_i \sin \alpha - v_b \tau \cos \alpha ; \quad (17)$$

$$y = h_i \cos \alpha - v_i \tau \sin \alpha - \frac{g \tau^2}{2} . \quad (18)$$

Длины верхней границы веера от ссыпающего края направляющей лопасти до открытой поверхности завала L_b и нижней L_n могут быть найдены по уравнениям (15) – (18) через криволинейные интегралы вида

$$L_{b,n} = \int_L f(x, y) dL . \quad (19)$$

Время падения потока наночастиц с направляющей плоскости

Время падения наночастиц с направляющей лопасти τ_n определяется с момента отрыва их от направляющей лопасти до момента соприкосновения с открытой поверхностью завала. Для определения численного значения τ_n необходимо совместить решения уравнений траектории падения наночастиц (13), (14) и уравнения открытой поверхности завала.

Открытая поверхность завала имеет сложную форму и до настоящего времени нет зависимостей, описывающих эту границу. Как показали сравнения экспериментальных и расчетных значений, при определении времени падения наночастиц с направляющей, уравнение открытой поверхности завала имеет вид

$$y = x \operatorname{tg} \alpha_n , \quad (20)$$

где α_n – угол между открытой поверхностью «завала» и горизонталью, °.

Решив совместно уравнения (13), (14) и (20), получим зависимости для определения координат точки пересечения траектории падающей наночастицы с открытой поверхностью завала и времени падения наночастицы:

$$M = \frac{1}{g} (v_i \cos \alpha + \operatorname{tg} \alpha - v_i \sin \alpha) ; \quad (21)$$

$$N = \frac{2}{g} (h_i \cos \alpha - h_i \sin \alpha \operatorname{tg} \alpha) .$$

Подставив в выражение (21) значения v_i и h_i для наночастиц, движущихся по верхней или нижней границе потока, найдем верхний предел интегрирования для интеграла (19). Нижний предел для конкретного случая равен 0.

Скорость падения потока наночастиц с направляющей плоскости

Для определения скорости падения частиц, при падении их с направляющей лопасти, необходимо продифференцировать уравнения (13) и (14) по времени:

$$v_{\Gamma} = v \cos \alpha ; v_{\text{в}} = v \sin \alpha + g t , \quad (22)$$

где v_{Γ} , $v_{\text{в}}$ – горизонтальная и вертикальная составляющие скорости движения наночастицы.

Для определения скорости движения наночастицы при прохождении ее горизонтального сечения $I - I$ (рис. 3), необходимо в уравнении (15) подставить значение $y = H$, найти значение t и по уравнениям (22) определить значение v_{Γ} и $v_{\text{в}}$.

Ранее отмечалось, что при падении с направляющей лопасти поток НДМ разрыхляется. По аналогии с коэффициентом разрыхления в скатывающемся слое, коэффициент разрыхления потока наночастиц K можно представить в виде отношения объема V_g количества НДМ Q , в движении, к объему $V_{\text{п}}$, занимаемому таким же количеством НДМ, движущегося по направляющей лопасти.

Для выяснения причин возникновения разрыхления падающего потока НДМ рассмотрим разрыхление потока в горизонтальном и вертикальном направлениях. При определении коэффициента разрыхления в горизонтальном направлении K_{Γ} , необходимо рассмотреть падение наночастиц 1 и 2, которые на направляющей находятся в различных скоростных подслоях.

Расстояние L_2 между центрами тяжести наночастиц в горизонтальном направлении определим по выражению

$$L_2 = \frac{v_2^2 \cos \alpha \sin \alpha}{g} + v_2 \sqrt{\frac{v_2^2 \sin^2 \alpha}{g^2} + \frac{2h \cos \alpha}{g}} , \quad (23)$$

где v_1 , v_2 – скорости наночастиц в момент отрыва их от направляющей лопасти, м/с; α – угол между векторами скоростей и горизонталью; h – расстояние между центром тяжести наночастицы 2 и краем направляющей лопасти, в направлении нормальном к векторам скорости движения наночастиц, м.

Расстояние L_1 между точками пересечения траекторий падения наночастиц с горизонтальным сечением $I - I$ можно определить из выражения

$$L_1 = \frac{v_2^2 \sin \alpha}{g} + v_2 \sqrt{\frac{v_2^2 \sin^2 \alpha}{g^2} + \frac{2(h \cos \alpha + H)}{g}} + \frac{v_1^2 \sin \alpha}{g} - v_1 \sqrt{\frac{v_1^2 \sin^2 \alpha}{g^2} + \frac{2H}{g}} . \quad (24)$$

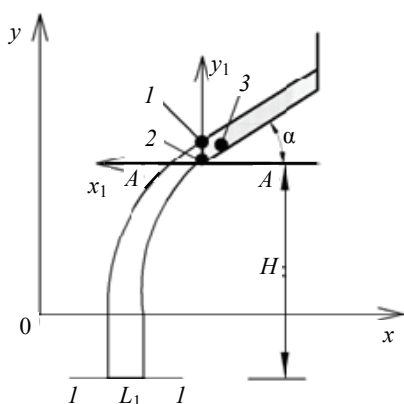


Рис. 3. Схема к определению коэффициента разрыхления материала НДС в веере

Для определения коэффициента разрыхления в веере K_v необходимо рассмотреть падение наночастиц 2 и 3, которые отрываются от направляющей одна за другой из одного и того же подслоя. В момент отрыва от лопасти наночастицы имеют одинаковые скорости, но наночастица 3 отрывается позже наночастицы 2. Время запаздывания τ_{32} можно определить из выражения

$$\tau_{32} = \frac{L_{32}}{v_3}, \quad (25)$$

где L_{32} – расстояние между центрами тяжести наночастиц в направлении их движения в момент отрыва наночастицы 2.

Расстояние между центрами тяжести в горизонтальном направлении, за некоторое время τ с момента отрыва наночастицы 3 от направляющей лопасти, определим по уравнению

$$L_\tau = v_2 \tau_{32} + \frac{g \tau_{32}^2}{2} + g \tau \tau_{32}, \quad (26)$$

из которого следует, что разрыхление НДМ в веере меняется по ширине и высоте. Однако при проведении практических расчетов удобнее пользоваться объемным коэффициентом разрыхления

$$K = \frac{V_d}{V_\Pi}, \quad (27)$$

где V_d , V_Π – объемы, занимаемые некоторым количеством движущегося материала и таким же его количеством в покое соответственно. Принимая, что

$$V_\Pi = L \int_S dS; \quad V_d = L_1 L v_{в.ср} \tau,$$

где L_1 – ширина веера в сечении $I - I$; $v_{в.ср}$ – вертикальная составляющая средней скорости движения материала при прохождении им сечения $I - I$, выражение (27) примет вид

$$K = \frac{L_1 v_{в.ср} \tau}{\int_S dS}. \quad (28)$$

Выводы

Анализ литературных источников и экспериментальные исследования поведения НДМ позволили выделить основные стадии при его движении из бункера: сначала вдоль виброднища, затем по направляющей лопасти и следующая – при падении в веере, и подтвердили возможность проникновения материалов из потока в поток [5, 20 – 22]. Анализируя движение НДМ на направляющей и при падении в веере потока, сделаны ряд выводов и допущений о свойствах движущегося слоя материала:

- скорость частиц v по высоте H веера потока материала возрастает, то есть $v = f(H)$;
- коэффициент разрыхления потока частиц K при падении материала прямо пропорционален высоте H и скорости v частиц $K = f(H, v)$;
- на скорость разгона потока на направляющей (а косвенно и на продолжительность процесса смешивания в целом) оказывает влияние, помимо физико-механических свойств сыпучих материалов, также угол ее наклона α (при увеличении угла α скорость потока возрастет);

– ширина раскрытия веера потока материала L меняется лишь до некоторой высоты H (до полного раскрытия веера), а затем остается практически постоянной, причем $L = f(v, Q, H, \alpha)$;

– на производительность установки (и время процесса) влияют площадь зазора S и угол наклона направляющей α , а влияние физико-механических свойств сыпучих материалов снижается из-за наличия вибратора.

Таким образом, впервые при анализе поведения нанодисперсного материала для расчета промышленного технологического оборудования использован традиционный подход. Рассмотрены особенности поведения нанодисперсного слоя и отдельных наночастиц применительно к элементам технологического оборудования. Сформулированы зависимости и даны рекомендации по проектированию бункерного узла, используемого для функционализации нанодисперсных материалов. Предложен общий подход к расчету и проектированию оборудования для подачи нанодисперсных материалов. Установлены особенности поведения нанодисперсного слоя на каждом этапе при подаче НДМ из бункера на его последующую обработку.

Список литературы

1. Ткачев, А. Г. Промышленные технологии и инновации. Оборудование для nanoиндустрии и технология его изготовления : учеб. пособие / А. Г.Ткачев, И. Н. Шубин, А. И. Попов. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 132 с.
2. Таров, Д. В. Аппаратурное оформление функционализации углеродных нанотрубок стеаратом титана / Д. В. Таров, Т. В. Гурова, И. Н. Шубин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 360 – 366. doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.360-366
3. Методика проектирования аппаратурного оформления производств углеродных нанотрубок и полупродуктов на их основе / А. В. Рухов, Д. В. Таров, Т. П. Дьячкова [и др.] // Изв. высш. учеб. заведений. Серия: Химия и хим. технология. – 2019. – Т. 62, № 3. – С. 94 – 101. doi: 10.6060/ivkkt.20196203.5959
4. Шубин, И. Н. Технологические машины и оборудование. Сыпучие материалы и их свойства : учеб. пособие / И. Н. Шубин, М. М. Свиридов, В. П. Таров. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2005. – 76 с.
5. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.
6. Мищенко, С. В. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение / С. В. Мищенко, А. Г. Ткачев. – М. : Машиностроение, 2008. – 320 с.
7. Диагностика физико-механических характеристик наноматериалов : учеб. пособие : в 2-х ч. / А. Г. Ткачев, И. Н. Шубин, А. А. Пасько [и др.]. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2014. – Ч. 1. – 96 с.
8. Определение размера частиц углеродных наноструктурированных материалов, полученных пиролизом пропан-бутановой смеси на металлическом катализаторе / А. И. Букатин, Ю. А. Ферапонтов, М. А. Ульянова [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2007. – Т. 13, № 1А. – С. 85 – 94.
9. Определение углов и коэффициентов трения углеродных наноматериалов / В. Ф. Першин, Т. Х. К. Алсайяд, Т. В. Пасько, А. А. Пасько // Ползуновский вестник. – 2018. – № 4. – С. 184 – 188.
10. Андрианов, Е. И. Методы определения структурно-механических характеристик порошкообразных материалов / Е. И. Андрианов. – М. : Химия, 1982. – 256 с.

11. Коузов, П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П. А. Коузов. – 2-е изд., испр. – Л. : Химия. Ленингр. отделение, 1987. – 262 с.
12. Свиридов, М. М. Текучесть сыпучего материала / М. М. Свиридов, В. П. Таров, И. Н. Шубин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1999. – Т. 5, № 4. – С. 553 – 559.
13. Čitaković, N. Physical Properties of Nanomaterials / N. Čitaković // Military Technical Courier. – 2019. – Vol. 67, Issue 1. – P. 159 – 171. doi: 10.5937/vojtehg67-18251
14. Mechanical Test Method and Properties of a Carbon Nanomaterial with a High Aspect Ratio / S. K. Jeon, H. S. Jang, O. H. Kwon, S. H. Nahm // Nano Convergence. – 2016. – Vol. 3, No. 29. – 10 p.
15. Roessler, T. Scaling of the Angle of Repose Test and its Influence on the Calibration of DEM Parameters using Upscaled Particles / T. Roessler, A. Katterfeld // Powder Technology. – 2018. – No. 330. – P. 58 – 66.
16. Guo, D. Mechanical Properties of Nanoparticles: Basics and Applications / D. Guo, G. Xie, J. Luo // Journal of Physics D Applied Physics. – 2014. – Vol. 47, No. 1. – 013001 (25 pp.). doi: 10.1088/0022-3727/47/1/013001
17. Filippov, A. A. Determination of the Mechanical Characteristics of Nanomaterials under Tension and Compression / A. A. Filippov, V. M. Fomin // Актуальные проблемы механики сплошной среды : материалы науч. тр. V Междунар. конф., 02 – 07 октября 2017 г., Цахкадзор, Армения. – Армения, 2017. – С. 164–165.
18. Варсанюфьев, В. Д. Вибрационная техника в химической промышленности / В. Д. Варсанюфьев, Э. Э. Кольман-Иванов. – М. : Химия, 1985. – 240 с.
19. Борщев, В. Я. Экспериментальное и аналитическое исследование быстрого гравитационного течения зернистой среды / В. Я. Борщев, В. Н. Долгушин, П. А. Иванов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2002. – Т. 8, № 3. – С. 436 – 443.
20. Шубин, И. Н. Разработка конструкций и методики расчета гравитационных смесителей для сыпучих материалов : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / Шубин Игорь Николаевич. – Тамбов, 2002. – 158 с.
21. Свиридов, В. М. Перемещения компонентов в процессе смешивания сыпучих материалов / М. М. Свиридов, В. М. Червяков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2002. – Т. 8, № 3. – С. 450 – 454.
22. Пономарев, Д. А. Моделирование процессов смешивания сыпучих материалов в статических поворотных смесителях : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08, 05.13.01 / Пономарев Денис Андреевич. – Иваново, 2006. – 155 с.

Features of Behavior of Moving Layer of Nanodispersion Material and their Accounting when Designing Technological Equipment

A. A. Popova, I. N. Shubin

*Department of Equipment and Production Technology of Nanomaterials,
alyona.popova.93@list.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: equipment; nanodispersed material behavior; calculation of technological parameters; carbon nanomaterial.

Abstract: The paper considers the features of the behavior of a nanodispersed layer and individual nanoparticles with regard to the processes of feeding from the hopper with the imposition of vibration, its movement along the guide vane and pouring flow in the receiving tank. An analogy of the behavior of flows of traditional dispersed materials, such as powders and industrial dusts, and nanodispersed ones, made it possible to distinguish the main stages during its motion. It has been established that the coefficient of flow loosening during the fall of nanodispersed material is directly proportional to the layer height and nanoparticle velocity. Dependencies are formulated and recommendations are given for designing a bunker assembly used in technological equipment for processing nanodispersed materials.

References

1. Tkachev A.G., Shubin I.N., Popov A.I. *Promyshlennyye tekhnologii i innovatsii. Oborudovaniye dlya na-noindustrii i tekhnologiya yego izgotovleniya: uchebnoye posobiye* [Industrial technology and innovation. Equipment for the nanotechnology industry and its manufacturing technology: a training manual], Tambov: Izdatel'stvo GOU VPO TGTU, 2010, 132 p. (In Russ.)
2. Tarov D.V., Gurova T.V., Shubin I.N. [Hardware design of the functionalization of carbon nanotubes with titanium stearate], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 360-366, doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.360-366 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Rukhov A.V., Tarov D.V., D'yachkova T.P., Orlova N.V., Shubin I.N., Tarov V.P. [Technique for designing hardware design for the production of carbon nanotubes and intermediates based on them], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology], 2019, vol. 62, no. 3, pp. 94-101, doi: 10.6060/ivkkt.20196203.5959 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Shubin I.N., Sviridov M.M., Tarov V.P. *Tekhnologicheskiye mashiny i oborudovaniye. Sypuchiye materialy i ikh svoystva: uchebnoye posobiye* [Technological machines and equipment. Bulk materials and their properties: a training manual], Tambov: Izdatel'stvo FGBOU VPO «TGTU», 2005, 76 p. (In Russ.)
5. Makarov Yu.I. *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Devices for mixing bulk materials], Moscow: Mashinostroyeniye, 1973, 216 p. (In Russ.)
6. Mishchenko S.V., Tkachev A.G. *Uglerodnyye nanomaterialy. Proizvodstvo, svoystva, primeneniye* [Century. Carbon nanomaterials. Production, properties, application], Moscow: Mashinostroyeniye, 2008, 320 p. (In Russ.)
7. Tkachev A.G., Shubin I.N., Pas'ko A.A., Pas'ko T.V., Memetov N.R., Baranov A.A. *Diagnostika fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik nanomaterialov: uchebnoye posobiye: v 2-kh ch.* [Diagnostics of the physico-mechanical characteristics of nanomaterials: a training manual: in 2 hours], Tambov: Izdatel'stvo FGBOU VPO «TGTU», 2014, part 1, 96 p. (In Russ.)
8. Bukatin A.I., Ferapontov Yu.A., Ul'yanova M.A., Shubin I.N., Tkachev A.G. [Determination of the particle size of carbon nanostructured materials obtained by pyrolysis of a propane-butane mixture on a metal catalyst], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2007, vol. 13, no. 1A, pp. 85-94. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Pershin V.F., Alsayyad T Kh.K., Pas'ko T.V., Pas'ko A.A. [Determination of angles and friction coefficients of carbon nanomaterials], *Polzunovskiy vestnik* [Polzunovsky Bulletin], 2018, no. 4, pp. 184-188. (In Russ.)
10. Andrianov Ye.I. *Metody opredeleniya strukturno-mekhanicheskikh kharakteristik poroshkoobraznykh materialov* [Methods for determining the structural and mechanical characteristics of powdered materials], Moscow: Khimiya, 1982, 256 p. (In Russ.)

11. Kouzov P.A. *Osnovy analiza dispersnogo sostava promyshlennykh pyley i izmel'chennykh materialov* [Fundamentals of analysis of the dispersed composition of industrial dusts and ground materials], Leningrad: Khimiya. Leningr. otdeleniye, 1987, 262 p. (In Russ.)
12. Sviridov M.M., Tarov V.P., Shubin I.N. [The fluidity of bulk material], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 1999, vol. 5, no. 4, pp. 553-559. (In Russ., abstract in Eng.)
13. Čitaković N. Physical Properties of Nanomaterials, *Military Technical Courier*, 2019, vol. 67, issue 1, pp. 159-171, doi: 10.5937/vojtehg 67-18251
14. Jeon S.K., Jang H.S., Kwon O.H., Nahm S.H. Mechanical Test Method and Properties of a Carbon Nanomaterial with a High Aspect Ratio, *Nano Convergence*, 2016, vol. 3, no. 29, 10 p.
15. Roessler T., Katterfeld A. Scaling of the Angle of Repose Test and its Influence on the Calibration of DEM Parameters using Upscaled Particles, *Powder Technology*, 2018, no. 330, pp. 58-66.
16. Guo D., Xie G., Luo J. Mechanical Properties of Nanoparticles: Basics and Applications, *Journal of Physics D Applied Physics*, 2014, vol. 47, no. 1, 013001 (25 pp.), doi: 10.1088/0022-3727/47/1/013001
17. Filippov A.A., Fomin V.M. *Aktual'nyye problemy mekhaniki sploshnoy sredy* [Actual problems of continuum mechanics], Proceedings of the V International Conference 02 - 07 October, 2017, Tsakhkadzor, Armeniya, 2017, pp. 164-165.
18. Varsanof'yev V.D., Kol'man-Ivanov E.E. *Vibratsionnaya tekhnika v khimicheskoy promyshlennosti* [Vibration technology in the chemical industry], Moscow: Khimiya, 1985, 240 p. (In Russ.)
19. Borshchev V.Ya., Dolgunin V.N., Ivanov P.A. [Experimental and analytical study of the fast gravitational flow of a granular medium], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2002, vol. 8, no. 3, pp. 436-443. (In Russ., abstract in Eng.)
20. Shubin I.N. *PhD Dissertation (Technical)*, Tambov, 2002, 158 p. (In Russ.)
21. Sviridov V.M., Chervyakov V.M. [Displacement of components in the process of mixing bulk materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2002, vol. 8, no. 3, pp. 450-454. (In Russ., abstract in Eng.)
22. Ponomarev D.A. *PhD Dissertation (Technical)*, Ivanovo, 2006, 155 p. (In Russ.)

Besonderheiten des Verhaltens der sich bewegenden Schicht von nanodispersen Materialien und deren Berücksichtigung bei der Projektierung der technologischen Ausrüstung

Zusammenfassung: Es sind die Merkmale des Verhaltens einer nanodispersen Schicht und einzelner Nanopartikel in Bezug auf die Prozesse der Zuführung aus dem Trichter mit Vibrationen, ihrer Bewegung entlang der Führungsschaufel und des Gießflusses in den aufnehmenden Tank betrachtet. Die Analogie des Verhaltens von Strömungen traditioneller dispergierter Materialien, beispielsweise Pulver und Industriestäube sowie nanodisperser Stoffe ermöglichte es, die Hauptstufen während ihrer Bewegung zu unterscheiden. Es ist festgestellt, dass der Fließkoeffizient, der sich beim Fallen von nanodispersen Material löst, direkt proportional zur Schichthöhe und zur Geschwindigkeit der Nanopartikel ist. Es sind Abhängigkeiten formuliert und Empfehlungen für den Entwurf einer Bunkerbaugruppe gegeben, die in technologischen Geräten zur Verarbeitung nanodisperser Materialien verwendet wird.

Particularités du comportement de la couche mobile du matériau nanodispersé et leur prise en compte dans la conception de l'équipement technologique

Résumé: Sont examinées les particularités du comportement de la couche nanodispersée et des nanoparticules particulières applicables aux processus d'alimentation à partir de la trémie avec des vibrations, un mouvement le long de la lame de guidage et un écoulement en vrac dans le réceptacle. L'analogie du comportement des flux des matériaux dispersés traditionnels, tels que les poudres et les poussières industrielles et nanodispersés a permis de mettre en évidence les principales étapes de son mouvement. Est établi que le coefficient de relâchement du flux lors de la chute du matériau nanodispersé est directement proportionnel à la hauteur de la couche et à la vitesse des nanoparticules. Sont formulées les dépendances et sont données des recommandations pour la conception de l'unité de trémie utilisée dans les équipements technologiques pour le traitement des matériaux nanodispersés.

Авторы: *Попова Алёна Алексеевна* – аспирант кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов»; *Шубин Игорь Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Борщев Вячеслав Яковлевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ДЛЯ ЗАМЕТОК