

**СОДЕРЖАНИЕ**

**Информатика, вычислительная техника и управление**

Применение аппарата искусственных нейронных сетей в задаче оптимизации процесса тестирования программного обеспечения <b>А.Д. Данилов, В.М. Мугатина.....</b>	<b>7</b>
Комбинированный метод анализа и выбора сложных технических или социально-экономических объектов <b>В.Л. Бурковский, Б.А. Шиянов, А.В. Гривачев, А.С. Сизов, Е.А. Титенко.....</b>	<b>15</b>
Некоторые замечания к определению пропускной способности по Шеннону <b>Ю.Я. Агранович, С.Л. Подвальный, И.Я. Новиков, С.А. Пруткова.....</b>	<b>21</b>
Модели и алгоритмы формирования состава модулей учебной дисциплины <b>М.Ю. Сергеев, Т.И. Сергеева, Н.И. Гребенникова.....</b>	<b>26</b>
Алгоритм подавления автоколебаний в следящих электроприводах на базе цифрового микроконтроллерного регулятора <b>Д.П. Лащенов, В.Л. Бурковский.....</b>	<b>33</b>

**Энергетика**

Исследование влияния нагрузки в следящей системе в MATLAB и SCILAB <b>А.П. Харченко, Ю.С. Слепокуров, П.А. Аверьянов, И.Ю. Свирский.....</b>	<b>39</b>
Экспериментальное исследование процесса сушки силикагеля в аппарате с центробежным псевдоожиженным слоем <b>А.А. Надеев, А.В. Барakov, В.Ю. Дубанин, А.Ю. Андреев.....</b>	<b>44</b>
Обобщенная структура системы принятия решений в условиях потенциально опасных объектов атомной энергетики <b>В.П. Поваров.....</b>	<b>51</b>
Прикладные методы системного анализа в задачах управления производством электроэнергии на Нововоронежской атомной электростанции <b>И.А. Колягина, А.Д. Данилов.....</b>	<b>57</b>
Математическая модель процесса взаимного теплообмена в электромеханотронных механизмах <b>А.И. Борисова, В.Л. Бурковский.....</b>	<b>66</b>
Оценка гидротермических характеристик компактного пористого теплообменника <b>В.И. Ряжских, Д.А. Коновалов, А.Ю. Трошин.....</b>	<b>70</b>
Интеграция в автоматизированную систему управления технологическим процессом промышленных предприятий тиристорных компенсаторов реактивной мощности <b>В.Н. Крысанов, К.В. Иванов.....</b>	<b>81</b>
Принципы разработки систем принятия решений в задачах управления ядерными блоками <b>В.П. Поваров.....</b>	<b>87</b>
Влияние температурного режима компрессорной станции на энергоэффективность работы участка газотранспортной системы <b>Л.В. Булыгина, В.И. Ряжских.....</b>	<b>92</b>

**Радиотехника и связь**

Архитектура канального кодирования на основе ПЛИС для 5G беспроводной сети с использованием высокоуровневого синтеза <b>М.В. Хорошайлова.....</b>	<b>99</b>
Высококачественные двухполосные рупорные акустические системы <b>А.С. Бадаев, А.С. Ковшарь .....</b>	<b>106</b>
Локализация и нейтрализация случайных дефектов при повышении ресурса	

работоспособности АЦП и ЦАП <b>В.С. Кононов, С.И. Рембеза</b> .....	114
VERILOG-описание и реализация на ПЛИС LDPC-декодера для высокоскоростной передачи данных <b>М.В. Хорошайлова</b> .....	120

### Машиностроение и машиноведение

Повышение эффективности шлифования импрегнированным абразивным инструментом, выделяющим активные газы среды <b>В.А. Носенко, А.А. Крутикова</b> .....	125
Определение размеров дефектов при ультразвуковом контроле литых корпусных деталей <b>М.Н. Давыдов, К.О. Беляева, Ю.С. Ткаченко</b> .....	132
Обработка металлических изделий машиностроения мощными ионными пучками <b>М.Ю. Турищев, Ю.А. Тишанинов, О.В. Горожанкина</b> .....	138

### Физика

Влияние отжига на структуру нанокompозитов Ni-Zr(Y)O <sub>2</sub> , полученных методом реактивного ВЧ-магнетронного напыления <b>М.С. Филатов, О.В. Стогней</b> .....	147
Математическое описание теплового состояния стержня элементарной ячейки полимерного канального огнепреградителя в среде продуктов сгорания авиационного топлива <b>В.И. Рубинов, В.Г. Самаркин, С.А. Гордиенко, А.А. Попов</b> .....	154
Определение предела прочности полимерного композиционного материала на сжатие после удара в соответствии со стандартом ASTM D 7137 <b>А.М. Кудрин, О.А. Караева, К.С. Габриельс, А.В. Солопченко</b> .....	164

CONTENTS

*Informatics, computer engineering and control*

Application of artificial neural networks for software testing optimization <b>A.D. Danilov, V.M. Mugatina</b> .....	7
A combined method of an analysis and selection of complex technical or socio-economic systems <b>V.L. Burkovskiy, B.A. Shiyanov, A.V. Grivachev, A.S. Sizov, E.A. Titenko</b> .....	15
Some notes to the determination of capacity by Shannon <b>Yu.Ya. Agranovich, S.L. Podvalny, I.Ya. Novikov, S.A. Prutkova</b> .....	21
Models and algorithms of forming the composition of discipline modules <b>M.Yu. Sergeev, T.I. Sergeeva, N.I. Grebennikova</b> .....	26
Algorithm of supression of self-oscillations in servo-drives based on digital microcontroller regulator <b>D.P. Lashchenov, V.L. Burkovskiy</b> .....	33

*Energetics*

Investigation of the load influence in the follow-up system in MATLAB and SCILAB <b>A.P. Kharchenko, Yu.S. Slepokurov, P.A. Aver'yanov, I.Yu. Svirskiy</b> .....	39
Experimental study of the silica gel drying process in the apparatus with centrifugal fluidized bed <b>A.A. Nadeev, A.V. Barakov, V.Yu. Dubanin, A.Yu. Andreev</b> .....	44
Generalized structure of the decision-making system in conditions of potentially hazardous nuclear power objects <b>V.P. Povarov</b> .....	51
Applied methods of system analysis in problems of power production control at Novovoronezh nuclear power plant <b>I.A. Kolyagina, A.D. Danilov</b> .....	57
Mathematical model of the process of mutual heat exchange in electromechanotronic mechanisms <b>A.I. Borisova, V.L. Burkovskiy</b> .....	66
Evaluation of the hydrothermal characteristics of porous compact heat exchanger <b>V.I. Ryazhskikh, D.A. Kononov, A.Y. Troshin</b> .....	70
Integration of tyristor compensators of reactive power into automated process control system of industrial enterprises <b>V.N. Krysanov, K.V. Ivanov</b> .....	81
The principles of system engineering decision-making in problems of control of nuclear units <b>V.P. Povarov</b> .....	87
Influence of the temperature regime of the compressor station on the energy efficiency of work of the gas transport system site <b>L.V. Bulygina, V.I. Ryazhskikh</b> .....	92

*Radio engineering and communication*

Architecture of FPGA based channel coding for 5G wireless network using high-level synthesis <b>M.V. Horoshaylova</b> .....	99
High-quality two-way horn acoustic systems <b>A.S. Badaev, A.S. Kovshar'</b> .....	106
Localization and neutralization of random defects during improving the working capacity of ADC and DAC <b>V.S. Kononov, S.I. Rembeza</b> .....	114
VERILOG-description and implementation on the FPGA LDPC-decoder for high-speed data	

transmission	
<b>M.V. Horoshaylova</b> .....	<b>120</b>

***Mechanical engineering and science of machines***

Increasing the grinding efficiency via impregnated abrasive tools releasing active gas media	
<b>V.A. Nosenko, A.A. Krutikova</b> .....	<b>125</b>
Determining sizes of defects at ultrasonic inspection of the casting details	
<b>M.N. Davydov, K.O. Belyaeva, Y.S. Tkachenko</b> .....	<b>132</b>
Processing of metal engineering products with powerful ion beams	
<b>M.Yu. Turishchev, Yu.A. Tishaninov, O.V. Gorozhankina</b> .....	<b>138</b>

***Physics***

The effect of annealing on the structure of Ni-Zr(Y)O <sub>2</sub> nanocomposites, obtained by the reactive HF-magnetron sputtering	
<b>M.S. Filatov, O.V. Stogney</b> .....	<b>147</b>
Mathematical description of the heat state of the elementary cell of polymer channel flame barrier in the medium of combustion products of aviation fuel	
<b>V.I. Rubinov, V.G. Samarkin, S.A. Gordienko, A.A. Popov</b> .....	<b>154</b>
Determination of the ultimate strength of polymer composite material for compression after impact, in accordance with standard ASTM D 7137	
<b>A.M. Kudrin, O.A. Karaeva, K.S. Gabriels, A.V. Solopchenko</b> .....	<b>164</b>

## *Информатика, вычислительная техника и управление*

УДК 004.054

### **ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТА ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

© 2018 А.Д. Данилов, В.М. Мугатина

**Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** процесс тестирования программного обеспечения (ПО) является важной, но при этом одной из наиболее ресурсозатратных активностей в жизненном цикле разработки программного продукта. Внесение правок в код ПО приводит к необходимости проведения нового цикла регрессионного тестирования, что обуславливает задачу оптимального распределения усилий в ходе выполнения тестов в различных модулях проверяемой системы. Рассмотрен наиболее распространенный подход к построению программного интерфейса современных веб-приложений – REST API, а также описаны особенности тестирования подобных продуктов, обусловлены преимуществами автоматизации процесса тестирования. С учетом обозначенных характеристик процесса тестирования ПО предложен подход, базирующийся на использовании аппарата искусственных нейронных сетей, позволяющий решать задачу классификации модулей на подверженные возникновению в них ошибок и на неподверженные в ответ на внесение изменений в код того или иного метода ПО. Такая классификация позволяет выделять ресурсы в большей степени на проверку только тех модулей, вероятность наличия ошибок в которых определена результатом работы нейронной сети. Приведена структура нейронной сети и обозначены параметры входных и выходных значений ИНС. Определены цели дальнейшего исследования предложенного подхода

**Ключевые слова:** тестирование программного обеспечения, нейронные сети, тестирование REST API, регрессионное тестирование, прогнозирование дефектов

#### **Введение**

Тестирование программного обеспечения (ПО), как на этапе разработки продукта, так и в процессе технической поддержки системы, находящейся в промышленной эксплуатации, является важной активностью, необходимой для обеспечения должного уровня качества продукта для конечного пользователя. В современном мире программные продукты становятся все более комплексными, размер таких систем постоянно увеличивается, в связи с чем индустрия разработки программного обеспечения сталкивается с проблемой ограниченности и недостаточности ресурсов, требуемых для исчерпывающего тестирования ПО.

В качестве способа решения задачи о сокращении объема требуемых ресурсов в процессе разработки ПО могут выступать инструменты, способные прогнозировать возникновение дефектов, то есть несоответствий между реальным и ожидаемым поведением программы, в том или ином модуле – составляющей части программного продукта [1]. Как показывает практика, 80% всех ошибок в продукте являются следствием неточностей, которые были допущены при написании 20% методов программы. Таким образом, если провести измерение подверженности дефектам той или

иной части функционала продукта в ответ на внесение изменений в конкретные методы кода и классифицировать модули на подверженные возникновению в них ошибок и на неподверженные, руководители проектов смогут выделять ресурсы для более интенсивного тестирования только тех модулей, в которых с большей степенью вероятности будут обнаружены дефекты. Такая стратегия позволяет максимально эффективно распределять усилия, требуемые на проведение тестирования, для нахождения наибольшего количества дефектов и более широкого покрытия потенциально уязвимых модулей программного продукта.

Для прогнозирования возникновения ошибок в том или ином модуле ПО требуется определение всех существующих зависимостей между методами в коде программного продукта и модулями, составляющими готовый продукт. Поскольку система таких взаимосвязей является комплексной и нелинейной, методы машинного обучения, такие как искусственные нейронные сети, способны обеспечивать наиболее адекватный результат в решении задачи прогнозирования появления дефектов по сравнению с традиционными линейными моделями [2].

Структурно статья состоит из следующих разделов: описание и основные характеристики

REST-архитектуры как одного из наиболее распространенных решений для веб-сервисов; особенности процесса тестирования веб-сервисов с применением в них REST технологии; рассмотрение аппарата искусственных нейронных сетей применительно к задачам тестирования ПО; представление структуры тестируемого ПО с помощью нейронной сети для прогнозирования подверженных ошибкам модулей продукта; заключение и постановка задач для дальнейшего исследования.

### REST архитектура ПО

Для построения значительного количества веб-сервисов (веб-служб) в современном мире используется специальный стиль архитектуры ПО для распределенных систем – REST. REST (Representational State Transfer, что переводится как «Передача состояния представления») предполагает унификацию взаимодействия между клиентом и сервером с использованием определенных стандартов (HTTP протокол запросов и ответов, универсальный стандарт построения URL, форматы данных – JSON или XML).

Клиент-серверная модель взаимодействия подразумевает разделение требований клиента и логики работы сервера (рис. 1). При этом сервер не хранит информацию о клиентах или результаты работы предыдущей операции, предполагая, что в запросе клиента к серверу хранятся все требуемые для обработки запроса данные и при необходимости данные для идентификации клиента. При этом пара «запрос» - «ответ» может быть кэшируемой, тогда данные ответа будут храниться на стороне клиента. В противном случае при каждом новом запросе клиент должен заново отправлять запрос на сервер.

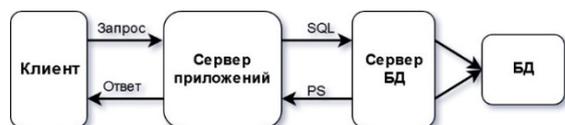


Рис. 1. Клиент-серверная архитектура

HTTP протокол определяет взаимодействие между клиентом и сервером, которое, как уже было упомянуто выше, основывается на базе сообщений-запросов (Request) и сообщений-ответов (Response). Оба вида сообщений состоят из трех основных частей: стартовая

строка, заголовки и тело. При этом только стартовая строка является обязательной составляющей сообщения.

Стартовая строка запроса представляет собой метод HTTP-запроса и идентификатор ресурса (URI, Uniform Resource Identifier). Идентификатор является постоянным (не изменяется в процессе обмена данными) и уникально определяет каждый ресурс.

В REST используются четыре основных HTTP- метода: GET, POST, PUT, DELETE. Чаще всего каждый из них служит для выполнения соответствующего действия из CRUD (аббревиатура, обозначающая набор действий по созданию, чтению, обновлению и удалению данных: create, read, update, delete). В REST общепринятыми считаются следующие соответствия:

- GET – прочитать, получить (read);
- POST – создать (create);
- PUT – изменить, обновить (update);
- DELETE – удалить (delete).

Стартовая строка ответа содержит в себе код состояния – целое число из трёх десятичных цифр, при этом первая цифра указывает на класс состояния: 1 – информационное, 2 – успешно, 3 – перенаправление, 4 – ошибка клиента, 5 – ошибка сервера. Наиболее часто встречаемые коды ответов:

- 200 (OK) – успешный запрос;
- 400 (Bad Request) – невалидный запрос;
- 404 (Not found) – ресурс не найден;
- 500 (Internal Server Error) – внутренняя ошибка сервера;

```

Запрос:
get/store/catalog/product/{productId}

Ответ:
Status Code:200 OK
"Content-Language": "en-US"
"Content-Type": "application/json"
"Date": "Fri, 01 Mar 2018"

{
  "attributes": [
    {
      "value": "180",
      "id": "LIFESPAN",
      "name": "Срок годности (в днях)"
    },
    {
      "value": "0,2",
      "id": "Weight",
      "name": "Macca"
    }
  ],
  "id": "12345",
  "name": "Конфеты 200г",
  "Price": "105.20"
}
  
```

Рис. 2. Пример REST-запроса

Помимо стартовой строки, в сообщении также могут содержаться заголовки и тело. Заголовки представляют собой набор пар из имени параметра и его значения. В заголовок может быть передана разнообразная служебная информация: название и/или версия браузера клиента, кодировка сообщения, формат передаваемых данных и т.д. В теле сообщения содержатся непосредственно передаваемые данные, представленные, как правило, в стандартном формате, например, XML или JSON. Пример обмена сообщениями (запрос и ответ) между клиентом и сервером представлен на рис. 2.

### Тестирование веб-приложений, построенных на основе REST

Подход REST API (API – Application Programming Interface, интерфейс программирования приложений) широко применяется к построению программного интерфейса современных веб-приложений и обуславливает некоторые особенности процесса тестирования системы [3].

Отслеживание сообщений HTTP - запросов и ответов в общении между клиентом и сервером позволяет более точно локализовать обнаруженные в работе веб-приложения ошибки. Это является важным аспектом, поскольку на уровне графического интерфейса вид ошибки может не предоставлять исчерпывающей информации о причинах неисправности.

Тестирование API обеспечивает экономию времени на этапе подготовки исходных тестовых данных и ситуаций. Так, если тест предполагает проверку редактирования определенного документа, в случае его исполнения на уровне графического интерфейса пользователя необходимо провести ряд действий для предварительной загрузки и последующего выбора данного документа. В случае же тестирования REST API, документ может быть указан в теле запроса.

Автоматизацию тестирования, то есть выполнение тестовых случаев в автоматическом режиме в большем объеме выгоднее проводить на уровне API. Это утверждение может быть проиллюстрировано с помощью «пирамиды автоматизации тестирования» (рис. 3).

В аспекте автоматизации пример тестового случая может оказаться неуспешным в случае выполнения на уровне графического интерфейса ввиду возможного наличия сопутствующих ошибок при обращении к различным веб-

элементам. Тест же на уровне API проверит непосредственно необходимый функционал.

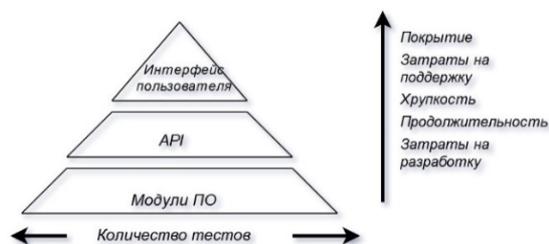


Рис. 3. Пирамида автоматизации тестирования

Важным моментом при тестировании REST API является возможность проводить тесты с большим количеством наборов исходных данных. В этом случае идентичный сценарий повторяется многократно для всех выбранных значений. Данная методология реализуется на уровне API с гораздо более приемлемыми скоростью и стабильностью по сравнению с реализацией через графический интерфейс.

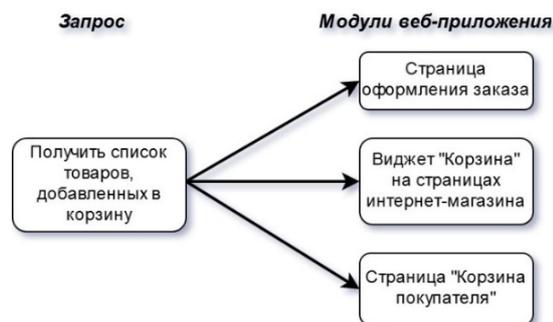


Рис. 4. Использование запроса в нескольких модулях продукта

Помимо прочего, одни и те же REST-запросы могут использоваться в различных модулях веб-приложения (рис. 4). Таким образом, при тестировании на уровне API, один запрос проверяется только один раз соответствующим набором тестов, а в случае тестирования графического интерфейса количество наборов тестов соответствует числу ситуаций во всех модулях приложения, в которых может быть вызван тестируемый запрос.

Однако проверка веб-приложения на уровне графического интерфейса не может быть проигнорирована, так как именно на данном уровне пользователь будет использовать разработанную систему, и все ошибки, с которыми может столкнуться пользователь, должны быть обнаружены и исправлены.

### Использование аппарата ИНС для прогнозирования подверженных ошибкам модулей ПО

Так как тестирование графического интерфейса пользователя (особенно ручное) требует значительных ресурсов, необходим способ, обеспечивающий оптимальное распределение усилий на проведение такого тестирования.

В данной статье предложен подход, в рамках которого при помощи аппарата искусственных нейронных сетей строится структура, определяющая взаимосвязи между методами REST-запросов и модулями веб-приложения, в которых потенциально могут появиться дефекты вследствие внесения изменений в код конкретного метода запроса.

Если в случае небольшого приложения решение данной задачи является очевидным, так как все взаимосвязи четко прослеживаются, то при работе с комплексным программным продуктом зависимости имеют сложно структурированный характер.

Описанная задача может быть интерпретирована как задача классификации модулей программного продукта на подверженные возникновению в них ошибок и на неподверженные в зависимости от наличия изменений в определенных методах кода.

Для решения обозначенной задачи может быть применен аппарат искусственных нейронных сетей.

Искусственная нейронная сеть (ИНС) – это система соединенных и взаимодействующих вычислительных единиц, роль которых выполняют искусственные нейроны. Каждый нейрон подобной сети имеет дело только с сигналами, которые он получает, и, производя определенные вычисления, передает другим нейронам. За счет способности к обучению такая сеть применима для решения сложных задач.

У каждого нейрона есть входы, на которые поступают сигналы, каждому из которых соответствует определенное значение, вес. Поступившие на входы сигналы умножаются на соответствующие им веса, после чего все произведения передаются в сумматор. Роль сумматора – агрегировать все входные сигналы в одно число, взвешенную сумму, которая характеризует сигнал, поступивший на нейрон. Далее нейрон обрабатывает взвешенную сумму при помощи функции активации и формирует выходной сигнал.

Структурно нейрон представлен на рис. 5.

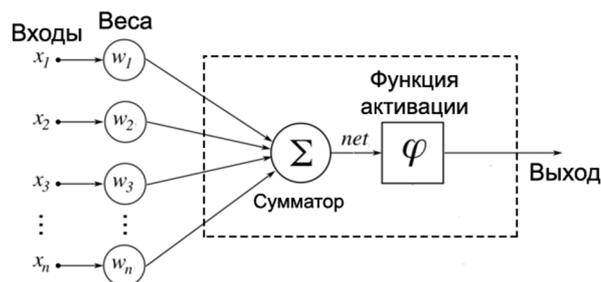


Рис. 5. Структура искусственного нейрона

Взвешенная сумма вычисляется с помощью формулы (1), а выход нейрона рассчитывается по формуле (2):

$$net = x_1 w_1 + x_2 w_2 + \dots + x_n w_n = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i, \quad (1)$$

$$out(net) = \phi(net) = \phi\left(\sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i\right). \quad (2)$$

В качестве функции активации могут быть использованы различные функции, например, (3).

$$out(net) = \frac{1}{1 + e^{-net}}. \quad (3)$$

Искусственные нейронные сети - это совокупность нейронов, объединенных в определенную структуру. Наиболее распространенным вариантом структуры нейросети является сеть, состоящая из нейронов входного слоя, одного или нескольких скрытых слоев и выходного слоя, пример такой сети приведен на рис. 6.

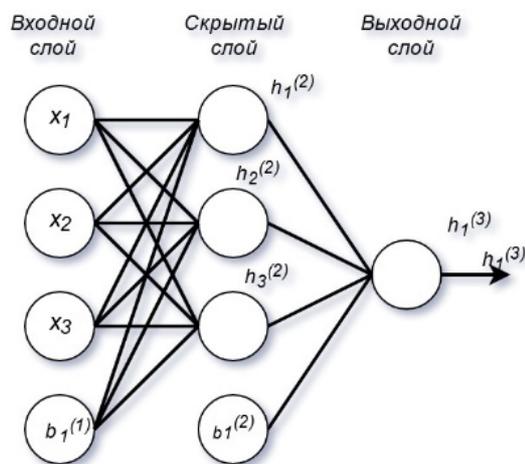


Рис. 6. Структура искусственной нейронной сети

Нейроны  $b_i$  – это нейроны смещения, особенность которых заключается в том, что они не имеют входных связей, а их вход и выход всегда равны 1. Нейроны смещения могут присутствовать в сети по одному на слое, либо отсутствовать. Назначение нейронов смещения – предоставлять возможность получения выходного результата путем сдвига графика функции активации влево или вправо.

Выходные значения нейронов скрытого слоя могут быть получены следующим образом:

$$\begin{aligned} h_1^{(2)} &= \phi(\omega_{11}^{(1)} x_1 + \omega_{12}^{(1)} x_2 + \omega_{13}^{(1)} x_3 + b_1^{(1)}), \\ h_2^{(2)} &= \phi(\omega_{21}^{(1)} x_1 + \omega_{22}^{(1)} x_2 + \omega_{23}^{(1)} x_3 + b_2^{(1)}), \\ h_3^{(2)} &= \phi(\omega_{31}^{(1)} x_1 + \omega_{32}^{(1)} x_2 + \omega_{33}^{(1)} x_3 + b_3^{(1)}). \end{aligned} \quad (4)$$

Вес соответствующего связи обозначается как  $w_{ij}^{(l)}$ , где  $i$  – номер узла в слое  $l+1$ ,  $j$  – номер узла в слое  $l$ .

Выходное значение нейрона, расположенного в выходном слое (результат работы сети), вычисляется по формуле:

$$h_1^{(3)} = \phi(\omega_{11}^{(2)} x_1 + \omega_{12}^{(2)} x_2 + \omega_{13}^{(2)} x_3 + b_1^{(2)}) \quad (5)$$

На начальном этапе значения весов  $W_{ij}$  задаются произвольным образом, затем в процессе обучения набор весовых коэффициентов настраивается так, чтобы сеть в ответ на определенный набор входных данных выдавала правильный (ожидаемый) результат. Для обучения нейронной сети могут быть использованы различные методы, один из которых – метод обратного распространения, в основе которого лежит алгоритм градиентного спуска. Обучение производится с помощью специальных выборок входных данных и соответствующих им корректных выходов сети.

Корректировку набора весов необходимо начать с выходного слоя. Рассчитав выходное значение сети по формуле (6), его можно сравнить с ожидаемым значением  $out$  (из обучающей выборки). Введем величину  $\sigma$  (дельта), которая будет равна разности между ожидаемым и реальным значением выхода, умноженной на производную функции активации выходного нейрона. Производная функции активации (3) равна:

$$out(net)' = out(net) \cdot (1 - out(net)). \quad (6)$$

Тогда дельта может быть рассчитана в соответствии с:

$$\sigma_{h3} = h_1^{(3)} \cdot (1 - h_1^{(3)}) \cdot (out - h_1^{(3)}). \quad (7)$$

Значения весов выходного слоя после коррекции (на итерации  $k+1$ ) рассчитываются согласно:

$$\omega_{ij}^{(2)}(k+1) = \omega_{ij}^{(2)}(k) + \eta \cdot \delta_{h3} \cdot h_1^{(3)}, \quad (8)$$

где  $\eta$  – коэффициент скорости обучения.

Затем необходимо рассчитать значения весовых коэффициентов для скрытого слоя. Для каждого из них рассчитывается значение дельты:

$$\begin{aligned} \sigma_{h1c} &= h_1^{(2)} \cdot (1 - h_1^{(2)}) \cdot (\delta_{h3} w_{11}^{(2)}), \\ \sigma_{h2c} &= h_1^{(2)} \cdot (1 - h_1^{(2)}) \cdot (\delta_{h3} w_{12}^{(2)}), \\ \sigma_{h3c} &= h_1^{(2)} \cdot (1 - h_1^{(2)}) \cdot (\delta_{h3} w_{13}^{(2)}). \end{aligned} \quad (9)$$

Веса скрытых слоев после коррекции (итерация  $k+1$ ) будут равны:

$$\begin{aligned} \omega_{11}^{(2)}(k+1) &= \omega_{11}^{(2)}(k) + \eta \cdot \delta_{h1c} \cdot h_1^{(2)}, \\ \omega_{12}^{(2)}(k+1) &= \omega_{12}^{(2)}(k) + \eta \cdot \delta_{h2c} \cdot h_2^{(2)}, \\ \omega_{13}^{(2)}(k+1) &= \omega_{13}^{(2)}(k) + \eta \cdot \delta_{h3c} \cdot h_3^{(2)}. \end{aligned} \quad (10)$$

Для каждого нейрона в скрытом слое вычисляется дельта и подстраиваются веса, ассоциированные с этим слоем, этот процесс повторяется для всех слоев по направлению к входу. После корректировки весовых коэффициентов выход сети рассчитывается заново с учетом новых значений весов. Итерации по корректировке весов продолжаются до достижения ошибкой определенного заранее минимального значения, либо заданного количества итераций.

После того, как сеть будет обучена, на вход может быть подан произвольный набор входных данных, отсутствующий в обучающей выборке, и нейросеть рассчитает выходное значение.

Таким образом, искусственная нейронная сеть может быть применима в задачах классификации. К такой задаче может быть сведена проблема определения модулей программного продукта, в которых могут содержаться ошибки вследствие внесения изменений в тот или иной метод кода.

### Представление структуры тестируемого ПО с помощью нейронной сети

Для того, чтобы применить аппарат искусственных нейронных сетей в решении обозначенной задачи прогнозирования подверженных ошибкам модулей продукта, необходимо определить, какая информация может быть использована в качестве входных и выходных данных ИНС.

В данной статье предложен подход, в рамках которого количество входных нейронов ИНС совпадает с количеством рассматриваемых методов кода (соответствующих REST-запросам). Значение входного параметра может быть равно 1 – в случае, когда в данный метод в ходе разработки вносились изменения, либо 0 – если изменений в коде рассматриваемого метода не было.

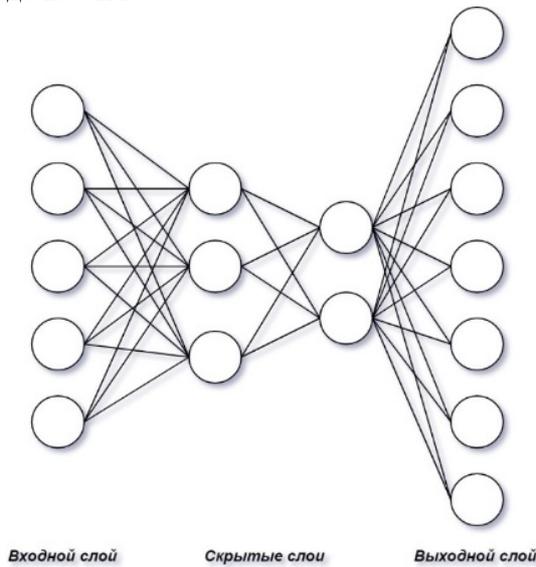


Рис. 7. Структура ИНС

Количество выходов нейронной сети определяется числом модулей графического интерфейса программного продукта, значения выходов при этом находятся в интервале от 0 до 1, где 0 соответствует минимальной вероятности наличия дефектов в данном модуле, 1 – максимальной.

Структура сети (представлена на рис. 7, количество скрытых слоев и нейронов скрытых слоев) может быть изменено в зависимости от результатов обучения сети для достижения минимальной ошибки работы ИНС.

Данные для обучающей выборки могут быть собраны в ходе этапов разработки программного решения, когда в ходе проверки внесения правок в том или ином методе (запросе) были обнаружены ошибки в различных модулях продукта.

### Пример использования нейросетевой структуры ПО в процессе тестирования

Применение предложенной нейросетевой структуры может быть проиллюстрировано на примере интернет-магазина (функционал

наполнения корзины покупателя). Набор рассматриваемых в рамках примера запросов и модулей тестируемого веб-приложения указан на рис. 8.

Обучающая выборка собрана на этапе разработки продукта путем определения частоты возникновения ошибок в каждом из семи перечисленных модулей в ответ на внесение изменений в один или несколько запросов (из пяти представленных). Фрагмент такой выборки представлен на рис. 9.

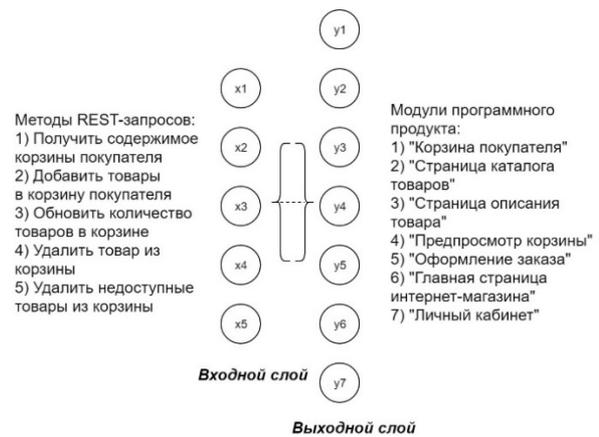


Рис. 8. Входные и выходные параметры ИНС

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	x1	x2	x3	x4	x5	y1	y2	y3	y4	y5	y6	y7
1	1	0	0	0	0	0,75	0,05	0,05	0,65	0,3	0,1	0,45
2	0	1	0	0	0	0,85	0,45	0,35	0,4	0,25	0,15	0,3
3	0	0	1	0	0	0,9	0,05	0,05	0,85	0,5	0,2	0,2
4	0	0	0	1	0	0,85	0,1	0,1	0,85	0,45	0,05	0,05
5	0	0	0	0	1	0,9	0,15	0,15	0,85	0,75	0,05	0,75
6	0	1	1	0	0	0,85	0,1	0,1	0,75	0,45	0,15	0,35

Рис. 9. Фрагмент обучающей выборки

Для моделирования сети был использован инструмент STATISTICA Automated Neural Networks. Нейронная сеть имеет 5 нейронов на входном слое и 7 нейронов выходного слоя.

Оптимальный результат обучения сети (рис. 10) был достигнут в случае следующей структуры: многослойный перцептрон, распределение нейронов по скрытым слоям: 5 – 5 – 7, метод обучения – BFGS, функция ошибки – среднеквадратичная ошибка выхода сети, функция активации – логистическая.

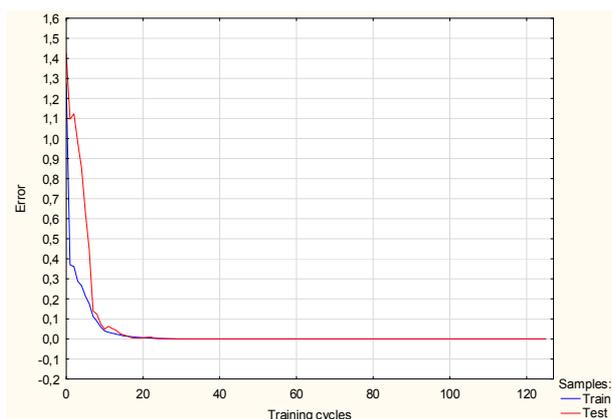


Рис. 10. Процесс обучения сети

В результате обучения нейронной сети был получен инструмент, позволяющий определять вероятность наличия дефекта в конкретном модуле вследствие изменения в том или ином методе. В рассматриваемом случае, если вычисленное нейросетью для модуля выходное значение превышает величину 0.3, модуль подвергается полноценному тестированию, в противном случае ограничивается поверхностным (smoke) тестированием. Если в ходе smoke-тестов был обнаружен дефект, такой случай направляется для дообучения сети.

### Заключение

В ходе работы были определены особенности тестирования веб-приложений, построенных с использованием REST API, выделена проблема ограниченности ресурсов, требуемых для проведения тестирования в ходе разработки программного продукта.

Предложен подход, позволяющий рассматривать структуру ПО в виде искусственной

нейронной сети, что предоставляет возможность после проведения обучения такой сети решать задачу классификации модулей программного продукта на подверженные наличию дефектов и на неподверженные, в ответ на внесение правок в тот или иной метод кода. Это позволяет оптимальным образом распределять ресурсы на проведение тестирования, уделяя повышенное внимание только потенциально дефектным модулям.

Предложенный подход был проиллюстрирован на примере структуры программного продукта. Большой интерес представляет рассмотрение нейронной сети, соответствующей структуре более сложного и комплексного программного обеспечения, для которого необходимо определить правила, согласно которым может быть собрана выборка примеров для максимально эффективного обучения сети, и проверить работу сети в ответ на реальные воздействия, выражающиеся во внесении изменений в код того или иного метода.

### Литература

1. Данилов А.Д., Мугатина В.М. Применение нейронных сетей для генерации сценариев тестирования программного продукта // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2016. Т. 4. № 6 (26). С. 16-21.
2. Данилов А.Д., Мугатина В.М. Верификация и тестирование сложных программных продуктов на основе нейросетевых моделей // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 6. С. 62-67.
3. Данилов А.Д., Фёдоров А.И. Иерархическая структура процесса тестирования сложного программного обеспечения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 3-1. С. 18-21.

Поступила 09.02.2018; принята к публикации 27.03.2018

### Информация об авторах

**Данилов Александр Дмитриевич** - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: danilov-ad@yandex.ru

**Мугатина Варвара Михайловна** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: varvaramugatina@gmail.com

## APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR SOFTWARE TESTING OPTIMIZATION

A.D. Danilov, V.M. Mugatina

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the process of software testing is important, but also it is one of the most resource-intensive activities in the life cycle of software product development. Making changes to the software causes the need for a new cycle of regression testing, and that is why problem of optimal distribution of efforts during test execution in various units of the system under test is actual. The paper considers the most common approach of building the program interface of modern web applications - the REST API, and describes the features of testing of such systems. The approach based on the use of artificial neural networks was proposed. This approach makes it possible to solve the problem of classifying modules into two groups: prone to error modules and modules without defects. This classification allows to allocate resources to check only those modules, the probability of having errors in which is determined by the result of the work of the neural network. The structure of a neural network is given and the parameters of input and output values of neural network are designated. The objectives of further research of the proposed approach are determined

**Key words:** software testing, neural networks, REST API testing, regression testing, default prediction

#### References

1. Danilov A.D., Mugatina V.M. "Application of artificial neural networks for test case generation", *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice (Aktualnye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika)*, 2016, vol. 4, no. 6 (26), pp. 16-21.
2. Danilov A.D., Mugatina V.M. "Verification and software testing of complex products based on neural network models", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2016, vol. 12, no. 6, pp. 62-67.
3. Danilov A.D., Fedorov A.I. "Hierarchical structure of software testing process", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2014, vol. 10, no. 3-1, pp. 18-21.

Submitted 09.02.2018; revised 27.03.2018

#### Information about the authors

**Aleksander D. Danilov**, Dr.Sci. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University, (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: danilov-ad@yandex.ru

**Varvara M. Mugatina**, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: varvaramugatina@gmail.com

## КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА И ВЫБОРА СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЛИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

© 2018 В.Л. Бурковский<sup>1</sup>, Б.А. Шиянов<sup>2</sup>, А.В. Гривачев<sup>3</sup>, А.С. Сизов<sup>3</sup>, Е.А. Титенко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup> Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

<sup>3</sup> Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

**Аннотация:** анализируются известные методы принятия решений. В качестве свойств методов отобраны алгоритмические свойства: тип вычислительного процесса, форматы данных, формы шкал измерений, квалиметрия, предобработка, вид решающего правила и др. Для задачи анализа, оценки и выбора лучшей альтернативы в условиях неполной или неточной информации не подходит ни один из рассмотренных методов. В связи с этим в работе предложена комбинация лучших свойств из рассмотренных методов: визуализация результатов, скрытые закономерности, учет нелинейности решающей функции. Разработан комбинированный метод, основанный на методе анализа иерархий и отличающийся этапами пред-, постобработки. В состав комбинированного метода введен этап получения дополнительной информации. Этот этап основан на выделении и обработке общих и индивидуальных показателей для подсистем объектов. Значения общих и индивидуальных показателей нормируются. Далее на их основе вычисляются веса. Эти веса используются в стандартных шагах метода анализа иерархий. Они применяются для коррекции матрицы парных сравнений критериев. Данный метод позволяет получить обоснованные оценки альтернатив с частично совпадающими показателями. Он также осуществляет выбор лучшей альтернативы с использованием дополнительной информации от кластеризации объектов и их упорядочения по весам общих и индивидуальных показателей

**Ключевые слова:** метод анализа иерархий, выбор, адаптивное решение, квалиметрическая диаграмма

### Актуальность работы

Одной из задач управления сложными техническими и социально-экономическими объектами (СТО или СЭО) является задача анализа, оценки и выбора лучшего варианта. Данная задача в условиях неполной и/или неточной информации о СТО или СЭО представляется слабоформализованной задачей. Соответственно для ее решения представляется оправданным применение и развитие методов и средств многокритериального принятия решений.

Известные модели и методы анализа, оценки и выбора СТО или СЭО основаны, как правило, на ограниченной декомпозиции объектов на подсистемы и их описании через существенные переменные. Решение задачи сводится к заданию детерминированных функциональных зависимостей между существенными переменными, заданию итоговой оценочной интегральной функции и исследованию такой функции на экстремум [1]. Вместе с тем корректность и эффективность такого подхода существенно зависит от априорных данных о весовой значимости каждой из переменных, их вероятностных распределениях. Такая информация не всегда

может быть формализована, что ограничивает аналитический подход [1, 2].

Более перспективным представляется развитие моделей и методов анализа, оценки и выбора лучшей альтернативы из множества рассматриваемых в условиях неопределенности исходных данных, основанных на адаптивных вычислениях и экспертных оценках – нейронные сети, генетические алгоритмы, методы весовых коэффициентов, парных сравнений, анализа иерархий, ранжирования и др. [3,4]. Эти модели и методы позволяют некоторым образом учитывать многокритериальность оценок, использовать неопределенность данных как информационный источник, что позволяет осуществлять оценку вариантов, их ранжирование и направленный выбор лучшей альтернативы [5]. С другой стороны, недостаток таких методов связывается с субъективной ролью экспертов и зависимостью от обучающей выборки. Кроме того, такие модели и методы не имеют внутренних средств для интерпретации рейтингов или адаптивного смещения оценок при изменении предпочтений экспертов или состава обучающей выборки.

В связи с этим представляется целесообразным создание комбинированного метода анализа и выбора лучшей альтернативы,

совмещающего аналитические, адаптивные вычисления с экспертными действиями. Для этого в работе для развития взят метод анализа иерархий [6, 7, 8].

### Обзор методов принятия решений по оценке и выбору альтернатив

Метод анализа иерархий (МАИ), разработанный Томасом Саати еще в 70-х годах XX века, является систематической процедурой для иерархического представления элементов [2], определяющих суть задачи. Метод состоит в декомпозиции предметной области на все более простые составляющие части и дальнейшей обработке последовательности суждений лица, принимающего решения (ЛПР), по парным сравнениям. В результате вычисляется относительная важность взаимодействия элементов в иерархии. Эти суждения затем выражаются численно. МАИ

включает в себя процедуры синтеза множественных суждений, получения приоритетности критериев и нахождения оценок альтернатив. Резюмируя, можно заключить, что МАИ не гарантирует для ЛПР получение оптимального решения, он позволяет ему в диалоговом режиме найти такой вариант (альтернативу), который наилучшим образом согласуется с сутью проблемы и требованиями к ней.

Тем не менее решение задачи анализа, оценки и выбора лучшей альтернативы методами принятия решений должно основываться на лучших возможностях различных методов. В связи с этим далее предлагается авторская трактовка ряда известных методов поиска и многокритериальной оценки. Для сравнения методов определены свойства, учитывающие алгоритмические особенности методов (табл. 1).

Таблица 1

Свойства методов выбора альтернатив

Наименование метода	Особенности метода	Свойства						
		Вычислительный процесс <sup>1</sup>	Формы исходных данных <sup>2</sup>	Формы шкал измерений <sup>3</sup>	Квалиметрия/визуализация	Предобработка	Учет имперфективной инф-ции	Решающее правило <sup>4</sup>
Метод последовательных уступок	Допускает повторные сравнения альтернатив, имеет ограничение на число сравниваемых альтернатив (<7), свыше - метод становится трудоемким	Р	С	ЧА	-	-	-	А
Метод парных сравнений	Имеет высокую точность оценки и сложность процесса проведения оценки	Р	С	К	-	-	-	А
Метод весовых коэфф.	Прост в формализации, имеет ясный логический смысл, но субъективен в назначении весовых коэффициентов	Р	С	ЧА	-	+	-	А
Метод идеальной точки	Вес показателей пропорционален совокупности системы показателей. Четкая формализованная постановка. Произвольный выбор метрики.	П	В	ЧА	+/-	+	-	А
Самоорганизующиеся карты Кохонена	Вес показателей может меняться при добавлении критериев. Устойчив к зашумленным данным, обучение, возможность визуализации. Фиксированное число кластеров.	А	М	ЧН	+	+	+	М,Н
Метод анализа иерархий	Большой объем информации от экспертов, наличие этапа проверки на согласованность экспертных данных	Р	М	ЧН	-	+	-	А,М

Продолжение табл. 1

ПАРЕТО-метод	Простота и наглядность, возможность неправильных выводов при частных некорректных оценках экспертов.	Р	М	ЧН	+/-	-	-	А
--------------	--	---	---	----	-----	---	---	---

<sup>1</sup> – Расчетный/Поисковый/Адаптивный

<sup>2</sup> – Скаляр/Вектор/Множество/Интервал/Безразмерная

<sup>3</sup> – Числовая Абсолютная/ Числовая Нормированная/Качественная

<sup>4</sup> – Аддитивное/Мультипликативное/Нелинейное/Квалиметрическая диаграмма

Анализ табл. 1 показывает, что рассматриваемые методы многокритериального выбора альтернатив СТО или СЭО в большинстве своем не являются адаптивными, они не позволяют вести обработку имперфективной информации об альтернативах и не имеют нелинейной решающей функции выбора лучшей альтернативы. Наиболее подходящими из рассматриваемых являются методы анализа иерархий и нейросетевые самоорганизующиеся карты, так как они имеют основу для извлечения дополнительной информации по альтернативам.

В связи с этим **сущность предлагаемого подхода** заключается в создании комбинированного метода, совмещающего расчетно-логические и адаптивные вычисления [9]. Комбинированный метод дополняет метод анализа иерархий этапами пред- и пост-обработки. Эти этапы используют и/или предоставляют ЛПП дополнительную информацию (визуализация результатов, обработка скрытых закономерностей, учет нелинейности), что позволяет повысить обоснованность принимаемых решений.

### Формирование дополнительной информации об альтернативах

Итак, задачи анализа, сравнения и выбора сложных технических и социально-экономических объектов и систем (анализ недвижимости, финансовых рынков; сравнение транспортных средств, технологий/методик производства наукоемкой инновационной продукции; выбор типа СПО, класса ИС и др.)

понимаются как поисковые задачи. В них неопределенность входных данных и промежуточных результатов являются их неотъемлемым свойством. В связи с этим кроме парных сравнений альтернатив между собой требуется дополнительная общесистемная информация, имеющая место быть для всех экземпляров рассматриваемого класса объектов или систем.

В качестве такой информации предлагается учитывать структурно-функциональные характеристики важнейших подсистем таких объектов в виде вклада общих и индивидуальных показателей подсистем объектов в критерии оценки. Пусть для  $m$  СТО или СЭО выделено  $q$  подсистем, а для них - общие показатели количеством  $s$  и индивидуальные показатели количеством  $p$ . Оценка СТО или СЭО осуществляется по  $k$  критериям. Тогда подмножество общих показателей  $S_i^*$ , принадлежащих  $K_i$  критерию ( $i=1-k$ ), соотносится с количеством  $s$ , а подмножество индивидуальных показателей  $P_i^*$ , принадлежащих  $i$ -му критерию ( $i=1-k$ ), соотносится с общим количеством  $p$ . Значения локальных весов показателей по  $j$ -й подсистеме ( $j=1-q$ ) определяются как

$$vs_{ij} = |s_i^*| / |s| \quad (1)$$

$$vp_{ij} = |p_i^*| / |p| \quad (2)$$

В итоге каждый объект  $O_z$  (СТО или СЭО) ( $z=1-m$ ) характеризуется двухэлементным вектором критериального веса  $(vs_i, vp_i)$  (табл. 2).

Таблица 2

Распределение общих и индивидуальных показателей объекта по  $k$  критериям

Критерии	$O_z$							
	1		2		...		q	
	$s$	$p_1$	$s$	$p_2$	...	$S_q$	$p_q$	
$K_i (i=1-k)$					...			
	$vs_1$	$vp_2$	$vs_2$	$vp_2$	...	$vs_q$	$vp_q$	

Двухэлементные векторы ( $vs_i, vp_i$ ) в табл. 2 по существу являются дополнительной информацией об альтернативе, понимаемой уже как составной объект. В дальнейшем формируются  $m$  таблиц по  $q \times k$  двухэлементных векторов, которые учитываются в выборе лучшей альтернативы.

### Комбинированный метод анализа и выбора альтернатив

Для обоснованного выбора приоритетной альтернативы из  $m$  возможных вариантов используется дополнительная информация о структуре объектов. Комбинированный метод анализа и выбора приоритетной альтернативы позволяет формализовать эту информацию и ввести в процесс принятия решения. Данный метод состоит из последовательности этапов:

- 1) подготовка исходных данных;
- 2) предобработка исходных данных;
- 3) квалиметрическая оценка;
- 4) этапы МАИ;
- 5) кластеризация результатов МАИ;
- 6) постобработка векторов весов альтернатив (вычисление расстояний).

На этапе подготовки исходных данных происходит структурирование предметной области и выделение основным подсистем объектов и критериев оценки, а также задание классов объектов.

На этапе предобработки выделяются общие и индивидуальные показатели, существенные для разграничения объектов. На их основе строится обобщенное пространство

показателей и задается распределение показателей по критериям.

На этапе квалиметрической оценки строятся квалиметрические диаграммы и производится расчет отношения площади полученной диаграммы к площади диаграммы так называемого «идеального объекта». Рассчитанное отношение сравнивается с заданным пороговым значением. Если оно меньше, то выполняется изменение пространства показателей, направленное на увеличение площади диаграммы, выполняется переход на этап 2.

Далее выполняются шаги этапа МАИ с учетом коррекции МПС двухкритериальными векторами.

На этапе кластеризации с помощью самоорганизующихся карт Кохонена [6] в рамках фиксированных классов осуществляется их проверочное объединение в кластера. Если однотипные объекты попадают в один кластер, то решение по ранжированию альтернатив на основе вычисленных векторов весов признается корректным. В противном случае необходимо изменение признакового пространства, осуществляется переход на этап 1.

На этапе постобработки производится свертка  $q$ -размерных векторов с использованием весовых коэффициентов, определяемых на 4 этапе. Для этого используется представление об идеальной точке в пространстве критериев. Используя евклидову метрику, вычисляется расстояние между идеальной точкой, и точкой, описывающей объект.

$$I = \frac{1}{\sqrt{\omega_1(1-x_1)^2 + \omega_2(1-x_2)^2 + \omega_3(1-x_3)^2 + \dots + \omega_q(1-x_q)^2}}, \quad (3)$$

где  $\omega_i$  - вес критерия ( $i=1-k$ ).

Интегральным показателем, описывающим приоритет объекта, будет величина, обратная полученному расстоянию, т.е. чем объект ближе к идеальной точке, тем данная альтернатива лучше.

### Выводы

Разработан комбинированный метод анализа и выбора приоритетной альтернативы, основанный на методе анализа иерархий и отличающийся введением проверочных этапов и использующий дополнительную информацию

о структуре объектов, проверочных квалиметрических диаграмм и кластеризации объектов самоорганизующимися картами Кохонена, что позволяет получить обоснованные оценки альтернатив с частично совпадающими показателями и выполнить выбор приоритетного объекта. Данный метод содержит этапы пред- и постобработки, они позволяют извлекать дополнительную информацию о свойствах и структуре объектов и могут применяться в многоальтернативных системах поддержки принятия решений [10].

### Литература

1. Зак Ю.А. Принятие многокритериальных решений. М.: Экономика, 2011. 235 с.
2. Халин Ю.А., Лисицин Л.А., Лисицин А.Л. Системы поддержки принятия управленческих решений в условиях неполной информации // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 4-2. С. 95.
3. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.
4. Биоинспирированные методы в оптимизации / Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик, П.В. Сороколетов. М.: Наука, 2009. 384 с.
5. Титенко Е.А., Тугов Е.Б. Модифицированный алгоритм поиска с итерационным заглублиением на графовых структурах // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 3. С. 82-90.
6. Елизаров Д.Э., Бурковский В.Л. Модификация метода Беллмана решения динамической задачи о ранце // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 5. С. 31-33.

7. Гривачев А.В., Сазонов С.Ю. Сравнительный анализ методов и подходов многокритериального выбора сложных мобильных систем // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 5. С. 35-43.

8. Модифицированный метод анализа иерархий для оценки эффективности робототехнических комплексов / А.В. Гривачев, С.Г. Емельянов, С.Ю. Сазонов, Е.А. Титенко // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2016. Т. 14. № 10. С. 14-18.

9. Довгаль В.М., Титов В.С., Титенко Е.А. Стратегии быстрых символьных вычислений для исчислительной продукционной системы // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2008. Т. 51. № 2. С. 44-47.

10. Иванов Д.В. Многоальтернативная система принятия решения для социотехнических объектов на основе теоретико-игровых методов и мультиагентных технологий в условиях риска // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 4. С. 8-14.

Поступила 26.02.2018; принята к публикации 27.03.2018

### Информация об авторах

**Бурковский Виктор Леонидович** - д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электропривода, автоматизации и управления в технических системах, Заслуженный деятель науки РФ, Воронежский государственный технический университет (394026, г. Воронеж, Московский проспект, д. 14), e-mail: bvl@vorstu.ru

**Шиянов Борис Анатольевич** - д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой гуманитарных и естественно-научных дисциплин, Международный институт компьютерных технологий (394026, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 "Б"), e-mail: shyanov.b@mail.ru

**Гривачев Александр Валерьевич** - аспирант, Юго-Западный государственный университет (305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94), e-mail: gagrun-22@mail.ru

**Сизов Александр Семенович** - д-р техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, Юго-Западный государственный университет (305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94), тел. 8-910-219-17-86

**Титенко Евгений Анатольевич** - канд. техн. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94), e-mail: johntit@mail.ru

## A COMBINED METHOD OF AN ANALYSIS AND SELECTION OF COMPLEX TECHNICAL OR SOCIO-ECONOMIC SYSTEMS

V.L. Burkovskiy<sup>1</sup>, B.A. Shyanov<sup>2</sup>, A.V. Grivachev<sup>3</sup>, A.S. Sizov<sup>3</sup>, E.A. Titenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup> International Institute of Computer technologies, Voronezh, Russia

<sup>3</sup> South West State University, Kursk, Russia

**Abstract:** well-known methods of decision-making are analyzed in the article. Algorithmic properties are chosen as properties of methods: the type of computational process, the data formats, the forms of measurement scales, qualimetry, preprocessing, the type of decision rule, etc. For the task of analyzing, evaluating and selecting the best alternative under incomplete or inaccurate information, none of the considered methods is suitable. That is why the paper proposes a combination of the best properties from the methods considered: visualization of results, hidden regularities, accounting for the non-linearity of the decision function. A combined method that has pre- and post-processing stages and is based on the hierarchy analysis method was developed. The composition of the combined method was supplemented with the stage of obtaining additional information. This stage is based on the allocation and processing of general and individual indicators for subsystems of objects. Values of general and individual indicators are normalized. Then, on their basis, weights are calculated. These are the weights that are used in the standard steps of the hierarchy analysis method. They are used to correct the matrix of paired criteria comparisons. This method allows to obtain reasonable estimates of alternatives with overlapping indicators. It also chooses the best alternative using additional information from clustering objects and their ordering by the weights of general and individual indicators

**Key words:** hierarchy analysis method, choice, adaptive solution, qualimetric diagram

References

1. Zack J.A. "The multi-criteria decision tasking" ("Prinyatie mnogokriterial'nykh resheniy"), Moscow, Ekonomika, 2011, 235 p.
2. Khalin Yu.A., Lisitsin L.A., Lisitsyn A.L. "Decision support system for control decisions in conditions of incomplete information", *Bulletin of South West State University (Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2012, no. 4-2, pp. 95.
3. Saati T.L. "Decision-making. Method of analyzing hierarchies" ("Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy"), Moscow, Radio i svyaz', 1993, 320 p.
4. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M., Sorokoletov P.V. "Bioinspired methods in optimization" ("Bioinspirirovannyye metody v optimizatsii"), Moscow, Nauka, 2009, 384 p.
5. Titenko E.A., Tutov E.B. "Modified search algorithm with iterative deepening on graph structures", *Bulletin of South West State University (Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2011, no.3, pp. 82-90.
6. Elizarov D.E., Burkovskiy V.L. "Modification of the Bellman method for solving the dynamic problem of knapsack", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no.5, pp. 31-33.
7. Grivachev A.V., Sazonov S.Yu. "Comparative analysis of methods and approaches of multicriteria selection of complex mobile systems", *Bulletin of South West State University (Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2016, no.5, pp. 45-43.
8. Grivachev A.V. Emelyanov S.G., Sazonov S.Yu., Titenko E.A. "Modified method for analyzing hierarchies for assessing the effectiveness of robotic complexes", *Information-measuring and control systems (Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy)*, 2016, vol. 14, no. 10, pp. 14-18.
9. Dovgal' V.M., Titov V.S., Titenko E.A. "Strategies for fast symbolic computations for the computing production system", *The bulletin of the High Scholl. Instrument Engineering (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie)*, 2008, vol. 51, no. 2, pp. 44-47.
10. Ivanov D.V. "Multi-alternative decision-making system for socio-technical objects on the basis of game-theoretic methods and multi-agent technologies in risk conditions", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2016, vol. 2, no.4, pp.8-14.

Submitted 26.02.2018; revised 27.03.2018

Information about the authors

**Victor L. Burkovsky**, Dr. Sci. (Technical), Professor, Honored Scientist of Russia, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospect, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: bvl@vorstu.ru  
**Boris A. Shyanov**, Dr. Sci. (Technical), Professor, International Institute of Computer Technologies (29 "B" Solnechnaya, Voronezh 394026, Russia), e-mail: shyanov@mail.ru  
**Aleksander V. Grivachev**, Graduate student, South West State University, (94 50 years of October street, Kursk 305040, Russia), e-mail: garpun-22@mail.ru  
**Aleksander S. Sizov**, Dr. Sci. (Technical), Professor, Honored Scientist of the Russian, South West State University, (94 50 years of October street, Kursk 305040, Russia)  
**Evgeniy A. Titenko**, Cand. Sci. (Technical), Associate professor, South West State University, (94 50 years of October street, Kursk 305040, Russia), e-mail: johntit@mail.ru

## НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПО ШЕННОНУ

© 2018 Ю.Я. Агранович<sup>1</sup>, С.Л. Подвальный<sup>1</sup>, И.Я. Новиков<sup>2</sup>, С.А. Пруткова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** приведено строгое обоснование определения пропускной способности по Шеннону для канала без шума основанное на теореме Перрона-Фробениуса. В своей первой работе Клод Шеннон делает ссылку на исчисление конечных разностей, как на основной математический аппарат, необходимый для обоснования вводимых понятий. Однако на самом деле этого недостаточно. Здесь требуются глубокие, нетривиальные результаты из области функционального анализа и теории графов. На осознание этого факта К. Шеннону потребовалось около десяти лет. В одной из своих статей 1957 года он вскользь указывает на это обстоятельство, однако ограничивается лишь краткой ссылкой на статью Фробениуса. Отметим еще одно существенное обстоятельство: качество русского перевода. Английский текст указанных работ К. Шеннона отличается от их перевода. Перевод, к сожалению, содержит размытые и логически ошибочные фразы, которые, в конечном счёте вводят читателя в заблуждение. Нам показалось естественным исправить указанные недостатки. В нашей работе приведена полная цепочка доказательств. Изложение сопровождается необходимыми определениями и формулировками соответствующих теорем. Сформулированы также нетривиальные нерешенные задачи, представляющие интерес как для специалистов, так и для аспирантов, а также студентов старших курсов, связанных с указанной проблематикой

**Ключевые слова:** пропускная способность канала без шума, теорема Перрона-Фробениуса, сопровождающая матрица, направленный граф, сильная связность

### Введение

В этом году своё 70-летие отмечает фундаментальная работа Клода Шеннона [1; 248], в которой впервые вводится понятие пропускной способности канала без шума. Определение, которое дано Шенноном, отсылает читателя к теории уравнений в конечных разностях. Однако только десять лет спустя в 1957 году Шеннон [2; 525] указал корректную схему доказательства, основанного на теореме Перрона-Фробениуса. Подробное доказательство в его работе отсутствует и настоящая статья направлена на то, чтобы восполнить этот пробел.

### Сопровождающая матрица полинома для канала без шума

Пусть задан многочлен

$$P(x) = x^n + a_1x^{n-1} + a_2x^{n-2} + \dots + a_n$$

*Определение.* Сопровождающей матрицей для многочлена  $P(x)$  называется матрица, характеристический многочлен которой есть  $P(x)$ .

Докажем, что матрица вида

$$A_n = \begin{pmatrix} -a_1 & -a_2 & -a_3 & \dots & -a_{n-1} & -a_n \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

является сопровождающей для данного многочлена.

Доказательство проведем методом математической индукции

1. При  $n = 2$

$$A_2 = \begin{pmatrix} -a_1 & -a_2 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

$$\lambda I - A = \begin{pmatrix} \lambda - a_1 & a_2 \\ -1 & \lambda \end{pmatrix}.$$

$$\det(\lambda I - A) = \lambda(\lambda + a_1) + a_2 = \lambda^2 + a_1\lambda + a_2.$$

2. Пусть это верно для  $n = k$ , т.е.

$$\det(\lambda I - A) = \det \begin{pmatrix} \lambda + a_1 & a_2 & \dots & a_{k-1} & a_k \\ -1 & \lambda & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & \dots & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \dots & -1 & \lambda \end{pmatrix} = \lambda^k + a_1 \lambda^{k-1} + \dots + a_k$$

Докажем, что отсюда следует, справедливость утверждения для  $n = k + 1$ . В самом деле, в этом случае имеем

$$\begin{aligned} \det(\lambda I - A) &= \det \begin{pmatrix} \lambda + a_1 & a_2 & \dots & a_{k-1} & a_k \\ -1 & \lambda & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & \dots & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \dots & -1 & \lambda \end{pmatrix} = \\ &= a_{k+1} \cdot (-1)^{k+2} \cdot (-1)^k + \lambda \det(\lambda I - A_k) = \\ &= a_{k+1} \cdot (-1)^{2u+2} + \lambda(\lambda^k + \lambda^{k-1} a_1 + \dots + a_k) = \\ &= \lambda^{k+1} + a_1 \lambda^k + \dots + \lambda a_k + a_{k+1} \end{aligned}$$

Тем самым доказана

*Теорема* (о сопровождающей матрице).

Сопровождающая матрица для многочлена

$$x^n + a_1 x^{n-1} + a_2 x^{n-2} + \dots + a_n$$

имеет вид

$$\begin{pmatrix} -a_1 & -a_2 & -a_3 & \dots & -a_{n-1} & -a_n \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

### Ориентированный граф для матрицы пропускной способности

Покажем, что граф, соответствующий матрице пропускной способности сильно связан.

Характеристический многочлен для уравнения в конечных разностях

$$N(T) = N(T - t_1) + N(T - t_2) + \dots + N(T - t_n)$$

имеет вид

$$x^{-t_1} + x^{-t_2} + \dots + x^{-t_n} - 1 = 0$$

Сопровождающая матрица в силу доказанной выше теоремы имеет вид:

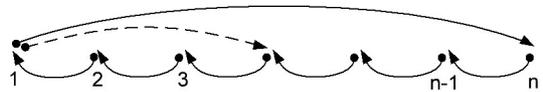
$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Причем в верхней строке последний элемент обязательно равен 1. Остальные элементы могут быть равны либо 0, либо 1.

Если  $a_{ij} = 0$ , то вершины  $i$  и  $j$  не связаны ребром. Если  $a_{ij} \neq 0$ , то вершины  $i$  и  $j$  связаны ребром, направленным от  $i$  к  $j$ .

*Определение.* Направленный граф называется сильно связным, если из любой вершины существует путь в любую вершину этого графа.

Граф, соответствующий указанной выше матрице, имеет вид



Меньшие стрелки, показывающие переходы из состояния  $n$  в  $n-1$  являются ребрами, соответствующими нижней поддиагонали, состоящей из 1.

Стрелка, показывающая переход из состояния 1 в состояние  $n$ , является ребром графа и соответствует (-1) в правом верхнем углу.

Пунктирная стрелка соответствует (-1) в верхней строке.

Легко видеть, что этот граф сильно связан.

Имеет место

*Теорема.* Матрица неразложима тогда и только тогда, когда ее направленный граф сильно связан.

*Определение.* (Неразложимая матрица).

Матрица, которая перестановкой одноименных строк и столбцов не может быть

приведена к виду

$$\begin{pmatrix} A & 0 \\ B & C \end{pmatrix}$$

называется неразложимой

*Определение.* Спектральным радиусом квадратной матрицы  $A$   $\rho(A)$  называется наибольший модуль ее собственных значений:

$$\rho(A) = \max_{i=1,n} \left[ |\lambda_i| \right]$$

### Определение пропускной способности по К. Шеннону (1948 год)

*Теорема Перрона – Фробениуса.*

Пусть элементы матрицы  $A$  неотрицательны и матрица неразложима, тогда (i)  $A$  имеет положительное собственное число, равное ее спектральному радиусу

$$\rho(A): \exists \lambda_i : \lambda_i = \rho(A)$$

(ii) этому соответствующему значению соответствует положительный собственный вектор, т.е. все его компоненты положительны

(iii) это собственное значение возрастает при возрастании любого элемента матрицы  $A$ .

(iv) это собственное значение однократно.

Сопровождающая матрица, соответствующая нашей задаче, т.е. характеристическому многочлену для уравнения канала без шума

$N(T) = N(T - t_1) + N(T - t_2) + \dots + N(T - t_n)$  состоит из 1 и нулей, т.е. ее элементы неотрицательны, в силу предыдущих рассуждений она неразложима, поэтому из теоремы Перрона – Фробениуса следует, что у нее существует максимальное собственное число вещественное и положительное, равное ее спектральному радиусу. Таким образом, характеристический полином имеет наибольший по модулю положительный вещественный корень  $x_0$ .

Тем самым мы доказали корректность определения пропускной способности по Шеннону, как  $C = \log x_0$ .

*Лемма* (уточнение величины  $x_0$ ).

Указанный выше корень  $x_0$  удовлетворяет неравенствам:

$$1 \leq x_0 < 2.$$

*Доказательство.* Нижняя оценка  $x_0 \geq 1$  нами доказана ранее. Докажем верхнюю оценку.

Заметим, что значение функции

$$P(x) = x^n - x^{n-1} - x^{n-2} - \dots - 1$$

при  $x = 2$  положительно. Рассмотрим самый худший случай: в выражении присутствуют все степени от  $n-1$  до  $1$ . Тогда

$$\begin{aligned} 2^n - 2^{n-1} - 2^{n-2} - \dots - 2 - 1 &= \\ = 2^n - (1 + 2 + 2^2 + \dots + 2^{n-1}) &= \\ = 2^n - (2^n - 1) &= 1 > 0. \end{aligned}$$

С другой стороны,  $P(1) < 0$ , если многочлен содержит не менее 3-х слагаемых, поэтому на интервале  $(1,2)$  есть корень.

$P(x)$  возрастает при  $x \geq 2$ . В самом деле

$$\begin{aligned} P'(x) &= \\ = nx^{n-1} - (n-1)x^{n-2} - (n-2)x^{n-3} - \dots - 1 &> \\ > nx^{n-1} - (n-1)[1 + x + x^2 + \dots + x^{n-2}] &= \\ = nx^{n-1} - (n-1) \frac{x^{n-1} - 1}{x-1} &= \\ = \frac{nx^n - nx^{n-1} - nx^{n-1} + n + x^{n-1} - 1}{x-1} &= \\ = \frac{nx^n - 2nx^{n-1} + x^{n-1} + n - 1}{x-1} &= \\ = \frac{nx^n - (2n-1)x^{n-1} + n - 1}{x-1} &= \\ = \frac{x^{n-1}[nx - (2n-1)] + n - 1}{x-1}, \end{aligned}$$

$$nx - (2n-1) > 0, \text{ т.е. } x \geq \frac{2n-1}{n} = 2 - \frac{1}{n}$$

То есть при  $x > 2$  числитель и знаменатель  $x - 1$  положительны и, следовательно,  $P(x)$  возрастает и, значит, не обращается в ноль. Таким образом, максимальный корень  $x_0 < 2$ .

*Лемма доказана.*

Это обстоятельство делает естественным выбор основания логарифма в определении пропускной способности равным 2. Иными словами, будем далее полагать, что

$$C = \log_2 x_0.$$

При этом в силу доказанной выше леммы для пропускной способности всегда выполнены неравенства

$$0 \leq C < 1$$

Причем, как было показано ранее  $C = 0$  лишь в случае алфавита, состоящего из одной буквы (одного окончания), во всех других содержательных случаях

$$0 < C < 1.$$

### Заключение

Сформулируем некоторые нерешенные задачи. Из теоремы Перрона – Фробениуса следует, что если в верхней строке сопровождающей матрицы заменить некоторые нули на единицы, то корень вырастет, однако, в любом случае  $x_0 < 2$ .

Отсюда следует такая задача: какие элементы верхней строки матрицы пропускной способности наиболее сильно влияют на величину пропускной способности. Численные эксперименты (Д.А. Вдовин, 3 к. бакалавриат, ВГТУ) показали, что таким свойством

обладают элементы, соответствующие старшим степеням сопровождающего полинома.

Авторам неизвестны условия, при которых полиномы Шеннона имеют ровно один корень на окружности спектрального радиуса.

### Литература

1. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. Математическая теория связи. М.: Издательство Иностранной литературы, 1963. 830 с.
2. Шеннон К. Некоторые результаты теории кодирования. М.: Издательство Иностранной литературы, 1963. 830 с.
3. Frobenius G. Über Matrizen aus nichtnegativen Elementen, Sitzungsber. Akad. Wiss. Berlin, 1912. P. 456-477.
4. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Физматлит. 2004.

Поступила 22.02.2018; принята к публикации 27.03.2018

### Информация об авторах

**Агранович Юрий Яковлевич** – д-р физ.-мат. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: agurya19591212@yandex.ru

**Подвальный Семён Леонидович** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: spodvalny@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1260-4883>

**Новиков Игорь Яковлевич** – д-р физ.-мат. наук, профессор, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), e-mail: igor.nvkv@gmail.com

**Пруткова Софья Александровна** – студент 3 курса, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: sof-prutkova@yandex.ru

## SOME NOTES TO THE DETERMINATION OF CAPACITY BY SHENNON

Yu.Ya. Agranovich<sup>1</sup>, S.L. Podvalny<sup>1</sup>, I.Ya. Novikov<sup>2</sup>, S.A. Prutkova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>Voronezh State University, Voronezh, Russia

**Abstract:** in this paper, we give a rigorous justification for the determination of the Shannon bandwidth for a channel without noise based on the Perron-Frobenius theorem. In his first work, Claude Shannon makes a reference to the calculus of finite differences, as the main mathematical apparatus required for the justification of the introduced concepts. However, in fact, this is not enough. This requires deep and non-trivial results from functional analysis and graph theory. It took Shannon about ten years to recognize this fact. In one of his articles written in 1957, he casually mentioned that, but confined himself to a brief reference to Frobenius' article. In addition, we note another significant fact: the quality of the Russian translation. The English text of these works by C. Shannon differs from their translation. The translation, unfortunately, contains vague and logically flawed phrases that ultimately lead a reader astray. It seemed natural to us to correct these shortcomings. In our work, the full flow of satisfaction is given. The presentation is accompanied by the necessary definitions and formulations of the corresponding theorems. Nontrivial unsolved problems of interest both for specialists and postgraduates, as well as senior students associated with this problem are formulated as well

**Key words:** capacity of channel without noise, the theorem of Perron-Frobenius, accompanying matrix, directed graph, strong connectivity

#### References

1. Shannon C.E., "A mathematical theory of communications", *Bell System Techn. J.*, 1948, vol. 27, no. 3, pp. 379-427, (Rus. ed.: Moscow, Izdatel'stvo Inostrannoy literatury, 1963, 830 p.)
2. Shannon C.E. "Certain results in coding theory for noisy channels", *Information and Control*, 1957, vol. 1, pp. 6-25 (Rus. ed.: Moscow, Izdatel'stvo Inostrannoy literatury, 1963, 830 p.).
3. Frobenius G. "Über Matrizen aus nichtnegativen Elementen", *Sitzungsber Akad. Wiss.*, Berlin, 1912, 456-477.
4. Gantmacher F.R. "Theory of matrices", Moscow, Fizmatlit, 2004.

Submitted 22.02.2018; revised 27.03.2018

#### Information about the authors

**Yuriy Ya. Agranovich**, Dr. Sci. (Physic and Mathematic), Professor, Voronezh State Technical University, (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: agyrya19591212@yandex.ru

**Semyen L. Podvalny**, Dr. Sci. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University, (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: spodvalny@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1260-4883>

**Igor' Ya. Novikov**, Dr. Sci. (Physic and Mathematic), Professor, Voronezh State University, (1 Universitetskaya square, Voronezh 394018, Russia), e-mail: igor.nvkv@gmail.com

**Sof'ya A. Prutkova**, Student, Voronezh State Technical University, (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: sof-prutkova@yandex.ru

## МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВА МОДУЛЕЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

© 2018 М.Ю. Сергеев, Т.И. Сергеева, Н.И. Гребенникова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** даны общие характеристики технологии модульного обучения и её значения для повышения эффективности и адаптивности обучения. Рассмотрены особенности модульного обучения. Показан способ формализации требований технологии модульного обучения и обеспечения вариативности содержания учебных материалов, различающихся сложностью учебных контентов. Рассмотрены математические модели оптимизации состава учебных модулей дисциплины, обеспечивающие оптимальные значения интегральных показателей качества обучения. Оценка альтернатив выбора осуществляется с применением экспертных оценок важности изучаемых модулей, а также с учетом вариантов полноты изложения учебного материала. Рассмотренные модели содержат ограничения на время аудиторного изучения материала. Предложены вероятностные алгоритмы решения задач формирования состава модулей обучения, реализующие сокращенный перебор возможных альтернатив решения и получение результата за конечное приемлемое число шагов. В ходе поиска оптимального решения реализуется пересчет вероятностей выбора альтернатив решения с учетом влияния выбранной альтернативы на функцию цели. Приведена структура информационного и программного обеспечения комплекса по формированию состава модулей дисциплин. Программное обеспечение представляет собой набор программных модулей, позволяющих реализовать предложенные модели и алгоритмы. Информационное обеспечение отображает структуру таблиц распределенной базы данных. Информационно-программный комплекс, построенный на основе предложенных моделей и алгоритмов, обеспечит согласованный выбор состава модулей учебной дисциплины

**Ключевые слова:** модульное обучение, модели формирования содержания обучения, показатели оценки состава модулей

### Введение

Современное вузовское образование располагает мощным инструментарием в виде образовательных информационных технологий. Как показывает инновационный опыт в сфере образования, совершенствование управления учебным процессом происходит на основе использования современного программно-технологического обеспечения образовательного процесса. Новизна образовательных технологий обеспечивается применением соответствующего информационно-программного обеспечения, выбор которого осуществляется исходя из потребностей учебного процесса с учетом эффективности и границ использования программного обеспечения.

На современном этапе развития в образовательном процессе применяются различные технологии обучения: технология проблемного обучения, технология модульного обучения, технология обучения в сотрудничестве, технология контекстного обучения и т.д. [1].

Характер деятельности и взаимодействия субъектов образовательного процесса изменился под действием влияния

современных образовательных технологий, что является их отличительным признаком. С течением времени изменяются приоритеты, вместо трансляции знаний на первое место выдвигается адаптация учебного материала к уровню знаний обучаемых, к созданию условий для более полной реализации потенциала конкретного индивидуума. Поскольку совершенствование образовательного процесса приводит к изменению требований к качеству и содержанию обучения, то и методики и методологии обучения в высшей школе постоянно обновляются за счет развития информационных технологий обучения и их информационно-программного обеспечения.

Интеграция современных технологий обучения, в том числе технологий модульного обучения, и новых информационных технологий в обучении приводит к повышению уровня развития образовательного процесса.

### Технология модульного обучения

Совершенствование образовательного процесса стимулируется развитием новых технологий. В частности, технология модульного обучения относится к современным технологиям, которые позволяют

сделать процесс обучения наиболее приближенным к индивидууму, активизируют познавательную деятельность, освоение учебного материала происходит более интенсивно.

При освоении образовательной программы необходимо иметь возможность осуществлять выбор учебного материала. Реализация происходит за счет использования модульного обучения, что позволяет выстроить последовательность изучения учебных тем, их объем и сложность [1].

Модульное обучение имеет свои особенности [1]:

- организация учебной деятельности осуществляется в соответствии с модульной учебной программой, в чем и заключается сущность модульного обучения. Банком информации и методическим руководством по освоению его содержимого является набор самостоятельных модулей, представляющих собой наполнение учебной программы обучения;

- реализуется возможность выбора уровня и направления освоения программы обучения;

- в рамках работы над учебным модулем достигается полная согласованность преподавателя и учащегося в процессе обучения;

- предполагается использование традиционных и интерактивных форм обучения и диалога в процессе обучения в качестве формы взаимодействия;

- по ходу освоения модулей контроль учебных достижений осуществляется посредством рейтинговой системы.

Технология модульного обучения предполагает разработку модульной образовательной программы, учебного плана, состоящего из учебных дисциплин (модулей).

На уровне учебной дисциплины модулизация обучения представляет собой разбивку содержания учебной дисциплины на относительно самостоятельные составляющие части – модули (разделы). Модуль учебной дисциплины является относительно самостоятельной единицей программы обучения, нацеленной на создание конкретной универсальной, общепрофессиональной, профессиональной компетенции или группы компетенций.

Разделы (модули) учебной дисциплины характеризуются:

- основным содержанием в рамках учебной дисциплины;

- целью изучения;

- перечнем компетенций, необходимых для освоения;

- ожидаемыми результатами (знания, умения, владения);

- темами лекций, практических и лабораторных работ, темами для самостоятельного изучения;

- списком рекомендуемой литературы (основная и дополнительная учебная литература, учебно-методические разработки для организации практических, лабораторных работ, для выполнения курсовых работ, курсового проектирования, самостоятельной работы);

- организационными формами обучения (лекции, лабораторные работы, индивидуальные задания и т.д.);

- видами и формами контроля, критериями оценки результатов обучения;

- фондом оценочных средств (вопросы к зачету или экзамену, тестовые контрольные материалы, индивидуальные задания на отработку умений и навыков, темы исследований, курсовых работ и проектов);

- технологическим обеспечением, включающим техническое и программное обеспечение учебного процесса.

Все модули учебной дисциплины, как правило, делятся на более мелкие модули, являющиеся логически законченными частями, например, разделы, темы. Каждому модулю по уровням сложности (дисциплина, раздел, тема) присваивается экспертный коэффициент важности и для него определяется время освоения.

Модульная технология обучения для успешной реализации должна обеспечить:

- вариативность содержания;

- выбор условий и темпа работы с этим содержанием;

- разнообразие форм взаимодействия участников учебного процесса;

- условия для реализации возможности принять решение о составе учебных модулей для теоретического изучения, их сложности и важности для будущей профессии.

### Модели формирования состава модулей учебной дисциплины

Для формирования состава учебных модулей изучаемой дисциплины предложены оптимизационные модели. Данные модели обеспечивают выбор состава учебных модулей с приемлемыми значениями интегральных показателей качества, предложенных экспертами [2, 5]. Для обеспечения выбора предлагаются переменные, управляющие выбором модулей (тем учебного курса).

Введем следующие обозначения.

$L$  ( $l=1, \dots, L$ ) – количество тем лекций учебной дисциплины; тема лекции входит в состав модуля более высокого уровня, например раздела; эксперты определяют тематику лекций; количество тем зависит от общего количества часов, выделяемых на лекции.

Переменная  $n_l$  ( $n_l = 1, 2, 3, 4$ ) – номер варианта выбора темы; темы имеют разные варианты изложения (тезисный, стандартный и расширенный варианты, самостоятельное изучение).

Переменная  $v_l$  – весовой коэффициент важности  $l$ -й темы (весовые коэффициенты задает эксперт или группа экспертов, в последнем случае вычисляется средний коэффициент).

Переменная  $w_{lnl}$  – среднее время освоения  $l$ -й темы в варианте  $n_l$  во время лекционных занятий. Среднее время задает эксперт или группа экспертов. В случае привлечения группы экспертов вычисляется среднее время для каждого варианта. Среднее время может задаваться также следующим образом: тезисный вариант – 1 час, стандартный вариант – 2 часа, расширенный вариант – 4 часа.

Константа  $T$  – общее время лекционных занятий для дисциплины из учебного плана.

Переменная  $x_{lnl}$  – это переменная, принимающая значение 1, если  $l$ -я тема в варианте  $n_l$  входит в обучающую программу, 0 – в противном случае.

Тогда модель формирования состава тем дисциплины, изучаемых во время лекционных занятий, будет следующей:

$$\begin{aligned} & \sum_{l=1}^L v_l x_{lnl} \rightarrow \max, \\ & \sum_{l=1}^L w_{lnl} x_{lnl} \leq T, \quad \sum_{n_l=1}^4 x_{lnl} = 1, \quad l = \overline{1, L} \end{aligned} \quad (1)$$

В данной задаче максимизируется сумма коэффициентов важности тем, изучаемых во

время лекционных занятий. Первое предложенное ограничение означает, что не превышает общее время изучения дисциплины. Второе ограничение определяет, что для каждой темы выбирается один вариант из возможных вариантов изучения.

Если необходимо учитывать время изучения каждого раздела, то задача (1) примет следующий вид (2).

В задаче (2)  $T_j$  ( $j=1, \dots, J$ ) – это время изучения  $j$ -го раздела. В задаче (2) будет столько ограничений, сколько разделов имеется в изучаемой дисциплине.  $J$  – это общее количество разделов.  $K_j$  – это количество тем в  $j$ -м разделе.

$$\begin{aligned} & \sum_{l=1}^L v_l x_{lnl} \rightarrow \max, \\ & \sum_{l=1}^{K_j} w_{lnl} x_{lnl} \leq W_j; \quad \sum_{n_l=1}^4 x_{lnl} = 1, \\ & x_{lnl} = \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases} \quad j = 1, \dots, J. \end{aligned} \quad (2)$$

### Алгоритмы формирования состава модулей учебной дисциплины

Алгоритмическая реализация задач (1)-(2) может быть построена на применении вероятностных адаптивных алгоритмов. Данные алгоритмы обеспечивают такое варьирование булевых переменных выбора, при котором за конечное число шагов обеспечивается поиск решения, близкого к оптимальному решению [3].

Алгоритмические процедуры решения комбинаторных оптимизационных задач с применением вероятностного адаптивного алгоритма изложены в [3, 8].

1 этап. Построение функции Лагранжа для исходных задач с целью избавления от ограничений.

2 этап. Определение итеративной процедуры пересчета вероятностей. Альтернативы выбора рассматриваются как случайные величины, принимающие значения 0 или 1. Для случайных величин задается одинаковое первоначальное распределение. Выбор варианта темы рассматривается как движение в пространстве случайных булевых величин. Вероятность выбора варианта темы определяется следующей итеративной процедурой:

$$\tilde{x}_k^{n+1} = f_k^{n+1}(\tilde{x}_k^n, \tilde{v}_k^{n+1}), \quad k = \overline{1, K} \quad (3)$$

Переменная  $K$  – это общее количество булевых переменных.  $K$  соответствует количеству тем, из которых происходит выборка.

Переменная  $\tilde{X}_k^n$  - случайная величина, полученная на предыдущей  $n$ -й итерации.

Переменная  $\tilde{V}_k^{n+1}$  - это случайная величина, играющая роль шага движения на  $n+1$ -й итерации.

Переменные  $\tilde{x}_k^n, \tilde{v}_k^{n+1} \in \overline{M}, \overline{M}$  образуют пространство случайных булевых величин.

Функции  $f_k^{n+1}$  - это случайные логические функции, определяющие вероятность получения значения случайной величины.

3 этап. Настройка вероятностей выбора. На каждой итерации реализуется пересчет трех вероятностей выбора. Во-первых, выбор варианта учебного модуля (темы) или движение в пространстве случайных величин осуществляется за счет изменения вероятности выбора для случайных булевых величин  $\tilde{X}_k$ . Во-вторых, реализуется настройка величины шага движения на каждой итерации  $\tilde{v}_k^{n+1}$ . В третьих, выполняется пересчет вероятностей выбора номера координаты случайного вектора  $\tilde{X}$ .

Для изменения вероятностей всех видов используется условие локального улучшения:

$$M\{L(\tilde{X}^{n+1}, Y) - M\{L(\tilde{X}^n, Y)\} > 0, \\ \tilde{X}^{n+1} = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_{t-1}, \tilde{x}_t^{n+1}, \tilde{x}_{t+1}, \dots, \tilde{x}_T); \\ \tilde{X}^n = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_{t-1}, \tilde{x}_t^n, \tilde{x}_{t+1}, \dots, \tilde{x}_T). \quad (4)$$

Условие локального улучшения оценивает значение функции в двух случаях: когда случайная переменная получает значение 1 или значение 0. Разность двух значений функции оценивается и обеспечивает или увеличение, или уменьшение вероятности выбора случайной величины.

Перемещение в пространстве случайных булевых величин в вероятностных характеристиках выполняется по правилу

$$P_k^{n+1} = P_k^n + P_{vk}^{n+1} [Q_{vk}^n \gamma(\tilde{\Delta}_{1k}^n L) - P_k^n \gamma(-\tilde{\Delta}_{1k}^n L)], \quad (5)$$

где  $\tilde{\Delta}_{1k}^n L$  - первая реализация случайной величины  $\tilde{\Delta}_k L$  на  $n$ -м шаге.

$$\tilde{\Delta}_k^n = L(\tilde{X}^n | \tilde{x}_k^n = 1) - L(\tilde{X}^n | \tilde{x}_k^n = 0) \quad (k = \overline{1, K}), \quad (6)$$

$\tilde{X}^n$  - вектор случайных булевых переменных на  $n$ -й итерации:

$$\tilde{X}^n = \{\tilde{x}_k^n\} \quad (t = \overline{1, K}, k \neq z), \quad \gamma(A) = \begin{cases} 1, A > 0, \\ 0, A \leq 0, \end{cases} \quad P_{vk}^{n+1} = P(\tilde{v}_k^{n+1} = 1). \quad (7)$$

Вероятность выбора величины шага движения на  $(n+1)$  итерации  $\tilde{v}_k^{n+1}$  реализуется так же, как (5) и (6) и выполняется по формуле:  $P_{vk}^{n+1} = P_{vk}^n + P_{\lambda k}^{n+1} \cdot [Q_{vk}^n \cdot \gamma(\tilde{\Delta}_{2k}^n L \cdot \tilde{\Delta}_{1k}^n L) - P_{vk}^n \cdot \gamma(-\tilde{\Delta}_{2k}^n L \cdot \tilde{\Delta}_{1k}^n L)].$  (8)

Если объединить (5) и (8), то полный вероятностный алгоритм решения задач (1), (2) реализуется по формуле:

$$P_k^{n+1} = P_k^n + \{P_{vk}^n + P_{\lambda k}^{n+1} \cdot [Q_{vk}^n \cdot \gamma(\tilde{\Delta}_{2k}^n L \cdot \tilde{\Delta}_{1k}^n L) - P_{vk}^n \cdot \gamma(-\tilde{\Delta}_{2k}^n L \cdot \tilde{\Delta}_{1k}^n L)]\} \cdot [Q_k^n \cdot \gamma(\tilde{\Delta}_{1k}^n L) - P_k^n \cdot \gamma(-\tilde{\Delta}_{1k}^n L)]. \quad (9)$$

Для повышения эффективности работы схемы (9) необходимо осуществлять управление выбором координат случайного вектора  $\tilde{X} = \{x_j\}$ . С этой целью вводят случайную величину  $\tilde{H}$ . Она управляет выбором случайной величины  $\tilde{x}_k$  ( $k = \overline{1, K}$ ).

Случайной величине  $\tilde{H}$  ставится в соответствие множество случайных величин  $\{\tilde{\mu}_k\}$ , которые определяют по следующей формуле:

$$\tilde{\mu}_k = \mu_k(H) = \begin{cases} 1, H = k, \\ 0, H \neq k, \end{cases} \quad k = \overline{1, K}. \quad (10)$$

С учетом условие локального улучшения алгоритм настройки значений вероятностей  $P_{\mu k}$  (третий уровень алгоритма) может быть определен аналогично (9) следующим образом:

$$P_{\mu k}^{n+1} = P_{\mu k}^n + P_{\zeta k}^{n+1} \cdot [Q_{\mu k}^n \cdot \gamma(\tilde{\Delta}_{1k}^n L \cdot \tilde{\Delta}_{3k}^n L) - P_{\mu k}^n \cdot \gamma(-\tilde{\Delta}_{1k}^n L \cdot \tilde{\Delta}_{3k}^n L)] \quad (11)$$

Переменная  $\zeta$  - это величина, которая является величиной шага движения при поиске  $\mu k$ ;  $\tilde{\Delta}_{3k} L$  - третья реализация случайной величины  $\tilde{\Delta}_z L$ .

4 этап. Проверка условия окончания перемещения в пространстве случайных величин, определяющих альтернативы выбора. Обычно задается 50-100 итераций.

Таким образом, адаптивный вероятностный алгоритм обеспечивает получение решения, близкого к оптимальному решению.

### Программное и информационное обеспечение

Программная реализация предложенных моделей и алгоритмов предполагает создание информационно-программного комплекса, включающего базу данных и программные модули, осуществляющие:

- формирование и администрирование базы данных учебно-методических контентов;
- генерацию состава и вариантов реализации тем учебной дисциплины;
- визуализацию созданного состава тем учебной дисциплины.

Функциональное назначение программных модулей представлено на рисунке.

Предполагается, что база данных будет содержать ряд таблиц [4, 8].

В таблице «Дисциплины» должны быть поля, содержащие данные о дисциплине: номер дисциплины, название, код из учебного плана, код направления подготовки, профиль или направленность подготовки; общее количество лекционных часов, отведенных на изучение дисциплины.

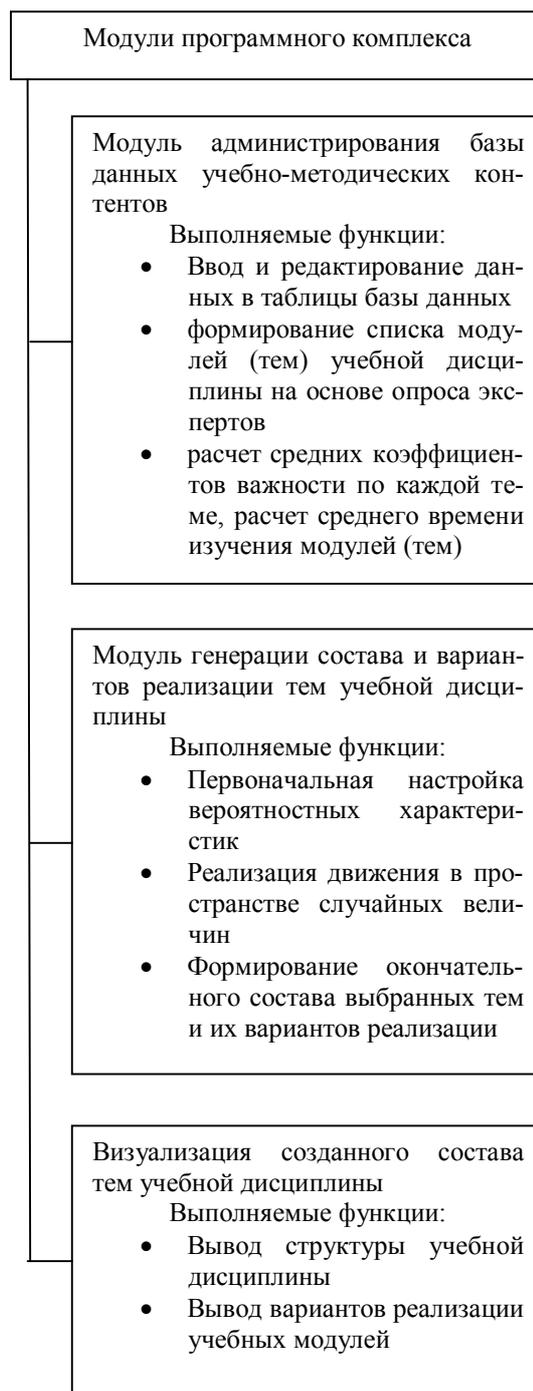
Таблица «Разделы» должна содержать следующую информацию: номер раздела, порядковый номер раздела в дисциплине, название раздела, номер дисциплины, общее количество лекционных часов на раздел.

Таблица «Темы» предполагает наличие информации о номере темы, порядковом номере темы в дисциплине, названии темы, номере раздела.

В таблице «Варианты тем» будут отражены данные о номере варианта темы, порядковый номер варианта в теме, тип варианта (тезисный, стандартный, расширенный), время изучения в часах, коэффициент важности, ссылка на файл с текстом лекции.

В таблицу «Состав модулей дисциплины» необходимо занести данные о номере модуля, номер варианта темы.

Таблица «Состав модулей дисциплины» является результатом выбора состава тем, представляющих модули дисциплины.



Функциональное назначение программных модулей

Сформированная база данных должна позволять получить следующие сведения:

- сведения о выбранной дисциплине (код направления, профиль, название дисциплины);
- группировку тем по разделу с выводом общей информации о разделе (номер и название раздела);

- список тем дисциплины, включенных в лекционные занятия (номер темы, название темы, количество часов, ссылка на файл с содержанием лекции).

Темы (модули), подлежащие самостоятельному изучению, также можно получить из базы данных.

### Заключение

На основе полученных моделей и алгоритмов возможно создание информационно-программного комплекса, в результате работы которого будет сформирован состав модулей дисциплин, адаптированный к стандартной программе обучения. При этом будут учтены оценки экспертов важности изучения модулей дисциплины и лимит времени, определенный для изучения отдельных тем и дисциплины в целом.

### Литература

1. Бордовская Н.В. Современные образовательные технологии. М.: КНОРУС, 2010. 432 с.
2. Подвальный С.Л., Сергеев М.Ю. Моделирование состава компонентов информационно-обучающей среды

// Современные проблемы информатизации в непромышленной сфере и экономике: сб. тр. Воронеж: Научная книга, 2005. Вып. 10. С. 57-58.

3. Сергеев М.Ю., Подвальный С.Л. Адаптивный алгоритм выбора компонентов учебно-информационной системы // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2005. Т. 1. № 5. С. 4-7.

4. Сергеев М.Ю., Подвальный С.Л. Оптимизация формирования многоуровневых контентов распределенных информационных систем: монография. Воронеж: ВГТУ, 2008. 173 с.

5. Сергеев М.Ю., Сергеева Т.И. Реализация технологии модульного обучения на основе специализированных информационно-программных комплексов // Экономика и менеджмент систем управления. 2017. № 4.2 (26). С. 221-227.

6. Подвальный С.Л., Сергеев М.Ю., Сергеева Т.И. Системы поддержки принятия решений на основе анализа многоуровневых контентов распределенной информационной системы // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2007. Т. 3. № 5. С. 5-7.

7. Сергеев М.Ю., Сергеева Т.И. Автоматизированные учебно-справочные комплексы // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 5-1. С. 49-51.

8. Сергеев М.Ю. Автоматизированная вычислительная система управления многоуровневым контентом // Системы управления и информационные технологии. 2010. Т. 39. № 1.2. С. 268-272.

Поступила 28.02.2018; принята к публикации 27.03.2018

### Информация об авторах

**Сергеев Михаил Юрьевич** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: mikesergeev@mail.ru

**Сергеева Татьяна Ивановна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: sergeevati\_vgtu@mail.ru

**Гребенникова Наталия Ивановна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: g-naty@yandex.ru

## MODELS AND ALGORITHMS OF FORMING THE COMPOSITION OF DISCIPLINE MODULES

**M.Yu. Sergeev, T.I. Sergeeva, N.I. Grebennikova**

**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** the general characteristics of the modular training technology and its implications for improving the efficiency and adaptability of training are given. Features of modular training are considered. The method of formalizing the requirements of the modular training technology and providing the variability of the content of teaching materials differing in the complexity of the learning content is shown. Mathematical models of optimization of the composition of the training modules of the discipline that provide the optimal values of integral indicators of the quality of training are considered. Evaluation of the choice alternatives is carried out using expert assessments of the importance of the modules studied, as well as taking into account the completeness options for the presentation of the training material. The considered models contain restrictions on the time of an audience study of the material. Probabilistic algorithms for solving the problems of forming the composition of training modules are proposed, realizing a brief search of possible alternatives to the solution and obtaining a result for a finite acceptable number of steps. In the search for the optimal solution, the recalculation of the probabilities of the choice of the solution alternatives is realized taking into account the effect of the chosen alternative on the goal function. The structure of information and software of the complex on formation of the modules of disciplines is given. The software allows to apply the proposed models and algorithms. Information support displays the structure of tables in a distributed database. Information and

software complex, built on the basis of the proposed models and algorithms, provide an agreed choice of the composition of the modules of the academic discipline

**Key words:** modular learning, models of the learning contents formation, indicators of modules structure estimation

#### References

1. Bordovskaya N.V. "Modern educational technologies" ("Sovremennye obrazovatel'nye tekhnologii"), Moscow, KNORUS, 2010, 432 p.
2. Podval'nyy S.L., Sergeev M.Yu. "Modeling the composition of components of the information-educational environment", *Modern problems of Informatization in the non-industrial sector and the economy: Coll. Pap. (Sovremennye problemy informatizatsii v nepromyshlennoy sfere i ekonomike: Sb. tr.)*, Voronezh, Nauchnaya kniga, 2005, vol. 10, pp. 57-58.
3. Sergeev M.Yu., Podval'nyy S.L. "Adaptive algorithm feature selection training and information systems", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2005, vol. 1, no. 5, pp. 4-7.
4. Sergeev M.Yu., Podval'nyy S.L. "Optimization of the formation of the layered contents of distributed information systems: monograph" ("Optimizatsiya formirovaniya mnogourovnevnykh kontentov raspredelennykh informatsionnykh sistem: monografiya"), Voronezh, Voronezh State Technical University, 2008, 173 p.
5. Sergeev M.Yu., Sergeeva T.I. "Implementation of modular learning techniques based on specialized software systems", *Economics and management of control systems. Scientific and Practical Journal (Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya. Nauchno-prakticheskiy zhurnal)*, 2017, no. 4.2 (26), pp. 221-227.
6. Podval'nyy S.L., Sergeev M.Yu., Sergeeva T.I. "Support Systems of decision-making based on the analysis of multi-level content of distributed information system", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2007, vol. 3, no. 5, pp. 5-7.
7. Sergeev M.Yu., Sergeeva T.I. "Automated training and reference complexes", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2014, vol. 10, no. 5-1, pp. 49-51.
8. Sergeev M.Yu. "Automatic computer system of multilevel content control", *Control Systems and Information Technology (Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii)*, 2010, vol. 39, no. 1.2, pp. 268-272.

Submitted 28.02.2018; revised 27.03.2018

#### Information about the authors

**Mikhail Yu. Sergeev**, Cand.Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: mikesergeev@mail.ru

**Tat'yana I. Sergeeva**, Cand.Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: sergeevati\_vgtu@mail.ru

**Natalia I. Grebennikova**, Cand.Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: g-naty@yandex.ru

## АЛГОРИТМ ПОДАВЛЕНИЯ АВТОКОЛЕБАНИЙ В СЛЕДЯЩИХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ НА БАЗЕ ЦИФРОВОГО МИКРОКОНТРОЛЛЕРНОГО РЕГУЛЯТОРА

© 2018 Д.П. Лащенов, В.Л. Бурковский

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** предлагается программный метод подавления автоколебаний в следящих электроприводах на базе цифрового микроконтроллерного регулятора. Приведены основные критерии и методы снижения уровня автоколебаний в адаптивных следящих системах с учётом нелинейностей характеристик передаточного и исполнительного механизмов. В качестве примера представлены методы подавления автоколебаний в следящем электроприводе с регулятором на базе цифрового микроконтроллера 1887BE4У, разработанные и опробованные в процессе пусконаладочных испытаний в рамках серийного производства, а также предварительных испытаний финишного изделия. Основными критериями устойчивой работы следящего привода в режиме позиционирования при малых изменениях управляющего воздействия являются минимизация люфтов в передаточном механизме, введение дополнительных датчиков положения и частоты вращения и на выходном звене исполнительного механизма, регулирование глубины обратной связи по оценке активного наблюдателя. Использование цифрового регулятора на базе микроконтроллера дает новые возможности для точной подстройки коэффициентов усиления по контурам углового положения, скорости вращения и ускорения с целью формирования оптимального закона управления приводом, обеспечивающим подавление режима автоколебаний при постоянных уровнях задающего сигнала. Предложенный в данной работе программный алгоритм является дополнением к цифровому микроконтроллерному регулятору и осуществляет автоматическую подстройку коэффициентов регулятора в режиме онлайн с учётом требуемых динамических показателей. В качестве исходных данных для определения оптимальных коэффициентов использованы скорость изменения входного сигнала и величина рассогласования по положению выходного звена

**Ключевые слова:** следящий электропривод, цифровой регулятор, адаптивный регулятор, микроконтроллер, автоколебания, автоматическое управление

### Введение

В процессе создания следящих электроприводов управления исполнительными механизмами разработчики нередко сталкиваются с проблемой возникновения автоколебаний, проявляющихся повышенным уровнем пульсаций тока электродвигателя и колебаниями выходного звена относительно заданного положения на частотах до 40 Гц при малых уровнях управляющего сигнала [1]. Данного рода явления связаны преимущественно с нестационарностью и нестабильностью характеристик нелинейного трения в исполнительном механизме, наличием люфтов в механическом тракте «электродвигатель – редуктор - выходное звено» и неполным измерением переменных состояния объекта. При этом следует принять во внимание, что повышение информативности следящей системы за счёт введения дополнительных датчиков в исполнительном механизме способствует улучшению показателей адаптивности регулятора и расширяет возможности минимизации уровня автоколебаний за счет компенсации нелинейностей элементов системы. Однако не всегда введение дополнительных регистриру-

ющих датчиков является технически и экономически целесообразно.

### Основные критерии и методы подавления автоколебаний

Традиционно в типовых следящих приводах с адаптивными регуляторами проблема подавления автоколебательных режимов решается путём подстройки параметров составляющих регулятора: согласования с сигналом датчика положения, начального смещения нулевой точки выхода регулятора, уровня выхода регулятора, глубины обратной связи по оценке активного наблюдателя и др. [2].

В следящем электроприводе с регулятором на базе цифрового микроконтроллера 1887BE4У, находящегося на этапе предварительных испытаний финишного изделия, ввиду незначительного уровня колебаний положения выходного звена ( $0,06 - 0,12^\circ$ ), определяющим критерием допустимой величины автоколебаний является амплитуда пульсаций тока якоря электродвигателя на уровне не более 12,5 А.

Математически основные критерии качества рассматриваемого следящего электропри-

вода с учётом требований технического задания можно сформулировать следующим образом.

Пусть  $X(t)$  – выходная переменная,  $X(\infty)$  – установившееся значение выходной переменной. Тогда

$$\begin{aligned} X(\infty) - X(t) &= X_3 - \xi(\infty) - X(t) = \\ &= \xi(t) - \xi(\infty) = \xi_n(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\xi(\infty)$  – установившееся значение сигнала ошибки;

$\xi(t)$  – динамическая составляющая сигнала ошибки;

$\xi_n(t)$  – переходная составляющая сигнала ошибки;

$X_3$  – заданное значение регулируемой величины.

Поскольку рассматриваемая система имеет колебательные процессы и одним из требований Заказчика является минимизация автоколебаний при отработке постоянных уровней сигнала задания, то наиболее подходящим критерием оценки качества регулирования следящего электропривода будет следующий интегральный критерий:

$$J_1 = \int_0^{\infty} \xi_n^2(t) dt \rightarrow \min. \quad (2)$$

Кроме того, ещё одним важным показателем качества следящей системы является количество потребляемой энергии, а в данном конкретном случае потребляемый ток электродвигателя. Данный критерий формулируется следующим образом:

$$J_2 = \int_0^{\infty} i_{дв}(t) dt \rightarrow \min. \quad (3)$$

В процессе изготовления и сборки серийного изделия задача обеспечения качества приводной системы в соответствии с заданными критериями решается путём методичного поэтапного контроля и жесткой выборки люфтов в передаточном редукторе, датчике положения и выходном звене с достижением значения суммарного люфта механического тракта «электродвигатель – редуктор - выходное звено» на уровне не более 7'.

При этом допустимое решение задачи путём увеличения прочности конструкции и точности механической обработки ДСЕ обязательно связывается с повышением металлоёмкости объекта и трудовых затрат при экономических ограничениях. Поэтому производственная практика выпуска следящих агрегатов определяет комплексный подход к подавлению упругих колебаний низких частот, но, в основном, за счет средств управления [3].

В ходе пуско-наладочных испытаний производится поэтапная проверка работоспособности привода, в том числе по критериям автоколебаний, и при необходимости осуществляется оперативная настройка и регулировка следящей системы. На аппаратном уровне выполняется подстройка параметров RC-фильтров на входных портах цифрового микроконтроллера по сигналам задания, положения выходного звена и скорости вращения приводного электродвигателя. На программном уровне осуществляется настройка регулировочных коэффициентов усиления цифровых сигналов: рассогласования по положению выходного звена, скорости вращения электродвигателя, ускорения эталонной модели. Применяемая комплексная настройка позволяет компенсировать максимальные возникающие нелинейности электромеханических составляющих системы, однако по причине неустойчивости и нестационарности нелинейных характеристик агрегатов требуется селективная настройка каждого отдельно взятого образца следящего привода, что в условиях серийного производства повышает затраты и трудоёмкость изготовления изделий. Кроме того, индивидуальная подстройка регуляторов приводит к увеличению разброса динамических параметров приводов, что является нежелательным, особенно при работе многоканальных следящих систем.

### Программный алгоритм подавления автоколебаний

С целью создания унифицированного программного обеспечения, исключающего необходимость индивидуальной настройки следящих приводов и обеспечивающего подавление автоколебаний, предлагается ввести в программу управления дополнительный алгоритм адаптивной подстройки контура регулятора скорости с использованием программного детектора частоты входного сигнала и отслеживанием рассогласования по угловому положению. Блок-схема предлагаемого алгоритма представлена на рис. 1.

Данный алгоритм предусматривает автоматическую подстройку коэффициента усиления составляющей регулятора по сигналу наблюдателя скорости в процессе работы следящего привода в соответствии со скоростью изменения задающего сигнала и величиной рассогласования по положению выходного звена.

На рис. 1 приняты следующие обозначения:

XN – фильтрованная величина модуля скорости входного сигнала;

EF5N – усиленный в 5 раз оцифрованный сигнал рассогласования по углу поворота выходного звена;

VOBN – сигнал наблюдателя по скорости электродвигателя;

UVOBN – составляющая сигнала управления по скорости;

KV1, KV2 – коэффициенты наблюдателя по скорости электродвигателя.

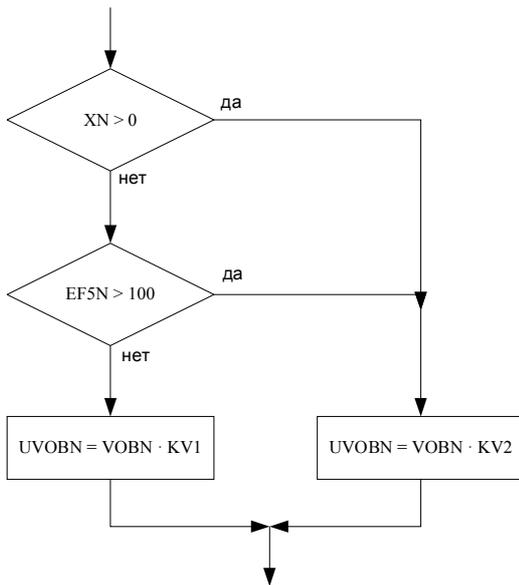


Рис. 1. Алгоритм адаптивной подстройки регулятора скорости

Результирующий сигнал управления (UN), формируемый регулятором, вычисляется по следующей формуле:

$$UN = (UEN + UWMODN \cdot Key) / KU - UVOBN, \quad (4)$$

где UEN – составляющая сигнала управления по рассогласованию угла поворота выходного звена. Вычисляется по формуле:

$$UEN = EF5N \cdot KE, \quad (5)$$

KE – коэффициент по рассогласованию в цепи главной обратной связи;

UWMODN – составляющая сигнала управления по оценке ускорения эталонной модели. Рассчитывается по формуле:  $UWMODN = WMODN \cdot KWM$ ;

WMODN – оценка ускорения эталонной модели;

KWM – коэффициент оценки ускорения эталонной модели;

Key – переменная, принимающая значения 0 или 1 в зависимости от величины ускорения;

KU – переменная, принимающая значения 1; 2; 4; 8 в зависимости от частоты сигнала задания.

Фрагмент программного кода микроконтроллерного регулятора в Algorithm Builder, содержащий рассмотренный алгоритм и расчёт результирующего сигнала управления представлен на рис. 2.

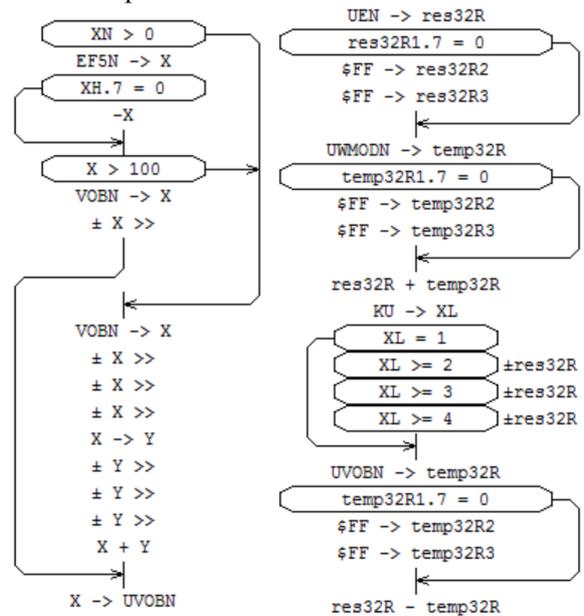


Рис. 2. Алгоритм расчёта результирующего сигнала управления в среде Algorithm Builder

Рассматриваемый микроконтроллерный регулятор следящего электропривода в целом можно описать следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} u_N(t) &= \frac{k_E \cdot \xi(t) + k_{ey} \cdot u_{WMODN}}{k_u} - k_v \cdot v_{OBN} \\ k_{ey} &= \begin{cases} 0, & z_N < 5, z_N > 35 \\ 1, & 5 \leq z_N \leq 35 \end{cases} \\ k_u &= \begin{cases} 1, & z_N \leq 28 \\ 2, & 28 < z_N \leq 42 \\ 4, & 42 < z_N \leq 60 \\ 8, & z_N > 60 \end{cases} \\ k_v &= \begin{cases} k_{v1}, & x_N = 0, \xi(t) < 100 \\ k_{v2}, & x_N \neq 0, \xi(t) > 100 \end{cases} \\ x_N &= x_N(\delta, \delta', t) \\ z_N &= z_N(\delta, \delta', t) \\ u_{WMODN} &= u_{WMODN}(\delta, \delta', \delta'', t) \\ v_{OBN} &= v_{OBN}(\omega_{дв}, t) \\ \xi(t) &= \delta(t) - \varphi(t), \end{aligned} \right. \quad (6)$$

где  $\omega_{дв}$  – частота вращения электродвигателя;

$\xi(t)$  – сигнал ошибки;

$\delta(t)$ - сигнал задания;  
 $\varphi(t)$  – сигнал положения.

Как видно из формулы (4), составляющая сигнала управления по скорости UVOBN выполняет роль демпфирующего звена: при возрастании скорости вращения электродвигателя UVOBN увеличивается, при этом усиливается подавление сигнала управления UN, и наоборот, на низких скоростях подавление минимально.

Таким образом, можно отметить, что увеличение коэффициента KV сигнала VOBN приведет к увеличению подавления сигнала управления при высоких значениях скорости вращения электродвигателя, что, как следствие, вызовет снижение динамических показателей привода и подавление автоколебательных режимов. Соответственно, уменьшение коэффициента KV обеспечивает повышение динамических показателей, но способствует возникновению автоколебаний.

Данный алгоритм работает следующим образом. Для оценки текущего режима работы привода (статический или динамический) используется переменная XN. Значение  $XN > 0$  является признаком изменения входного сигнала задания, т.е. динамического режима. В этом случае при расчёте составляющей сигнала управления по скорости UVOBN применяется коэффициент наблюдателя  $KV2 = 0,141$ .

Статический режим характеризуется значением  $XN = 0$ . Далее проверяется величина рассогласования по углу положения EF5N. Для обеспечения скорости переключки выходного звена при обработке ступенчатого сигнала задания в случае  $EF5N > 100$  при расчёте UVOBN применяется коэффициент KV2.

В случае, если  $XN = 0$  и  $EF5N < 100$ , при расчёте UVOBN применяется коэффициент  $KV1 = 0,5$ , что обеспечивает подавление автоколебаний.

Для сглаживания помех по сигналу оценки частоты входного сигнала задания в разделе «ДЕТЕКТОР» программы микроконтроллера узла управления каналом вводится цифровой КИХ-фильтр первого порядка входного сигнала задания FZN. Разностное уравнение фильтра имеет следующий вид:

$$FZNF(n) = \frac{FZN(n)+3 \cdot FZNF(n-1)}{4}. \quad (7)$$

Структурная схема фильтра приведена на рис. 3.

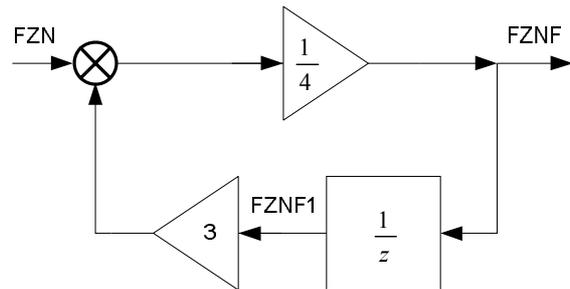


Рис. 3. Структурная схема цифрового фильтра сигнала задания:

FZN – цифровой сигнал задания угла поворота;

FZNF – фильтрованный цифровой сигнал задания угла поворота;

FZNF1 – значение фильтрованного цифрового сигнала задания угла поворота с запаздыванием на 1 такт микроконтроллера.

### Результаты моделирования

С целью оценки эффективности работы алгоритма по подавлению автоколебаний и его влияния на быстродействие следящей системы были проведены эксперименты по моделированию обработки ступенчатых и постоянных сигналов задания.

На рис. 4 и рис. 5 представлены временные диаграммы переходных процессов угла положения выходного звена и тока приводного электродвигателя при обработке ступенчатого (рис. 4) и постоянного (рис. 5) сигналов задания 10 град. без применения алгоритма подавления автоколебаний (а) и с применением алгоритма подавления автоколебаний (б).

Как видно из рис. 4, характер и качество переходных процессов при обработке ступенчатого сигнала задания с использованием алгоритма подавления автоколебаний (б) не отличаются от результатов, полученных без использования алгоритма (а): в обоих случаях время переходного процесса 55 мс, перерегулирование по сигналу положения менее 2 %, характер процесса аperiodический, максимальный ток электродвигателя 28 А.

На рис. 5 видно, что при обработке постоянного сигнала задания без применения алгоритма подавления автоколебаний возникают автоколебания амплитудой около 0,04 град. по положению и 1,5 А по току электродвигателя с частотой 54 Гц. В случае же применения рассматриваемого алгоритма низкочастотные автоколебания полностью подавляются: на графиках присутствует лишь незначительный высокочастотный шум.

Аналогичным образом алгоритм успешно функционирует во всём заданном диапазоне положений: - 30 ... 30 град., обеспечивая тре-

буемые показатели быстродействия и энергопотребления и сводя к минимуму уровень автоколебательных режимов.

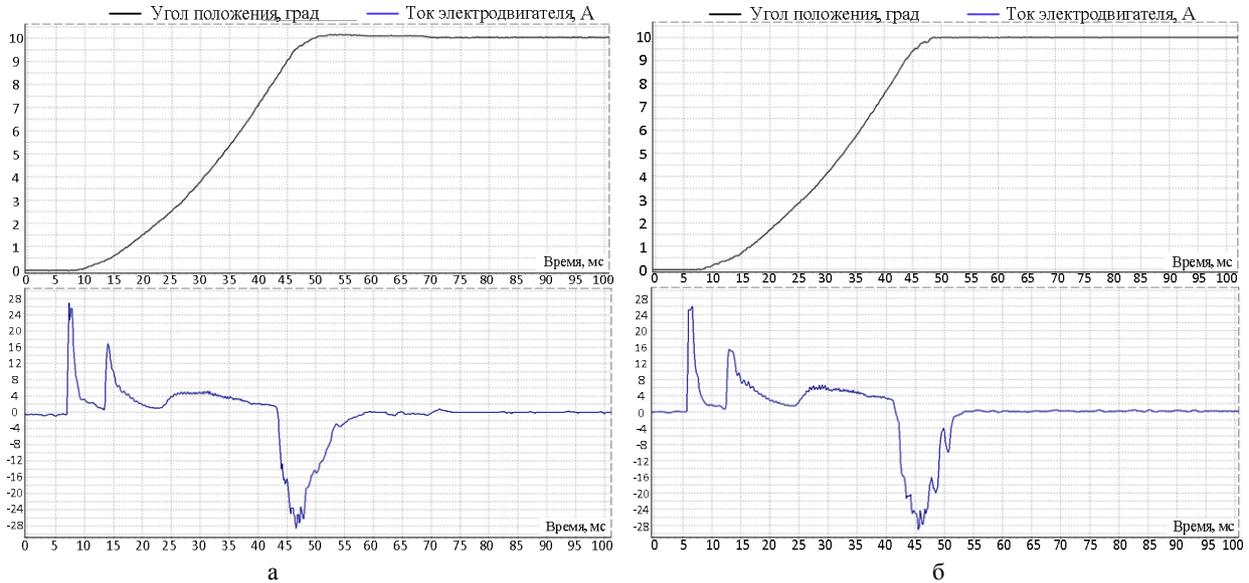


Рис. 4. Переходный процесс при обработке ступенчатого сигнала задания 10 град.:  
а - без применения алгоритма подавления автоколебаний;  
б - с применением алгоритма подавления автоколебаний

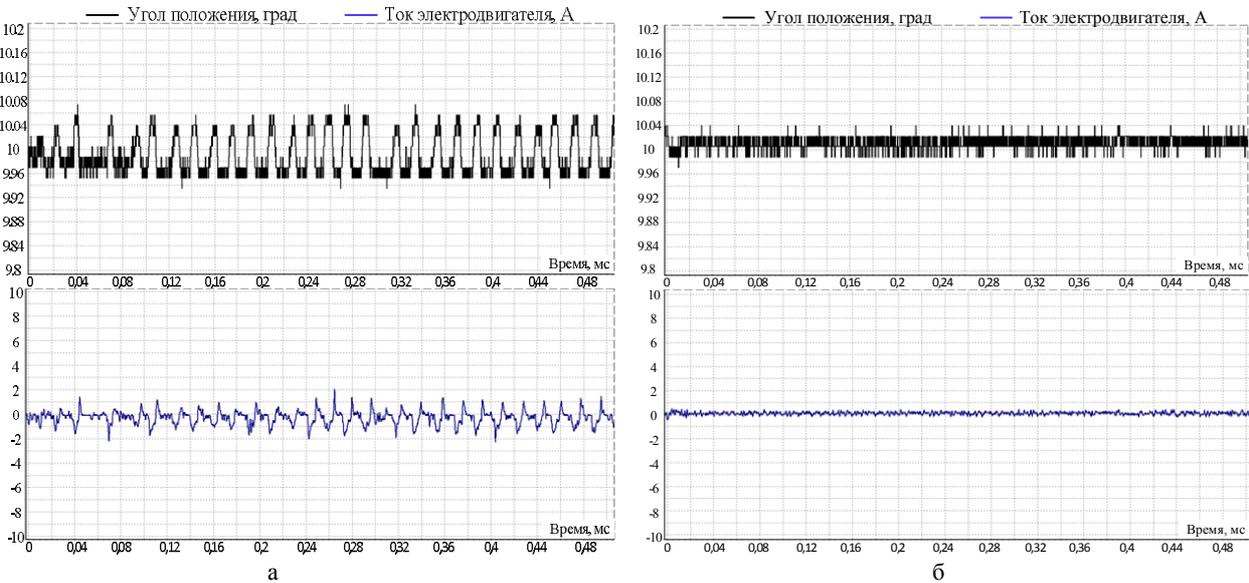


Рис. 5. Обработка постоянного сигнала задания 10 град.:  
а - без применения алгоритма подавления автоколебаний;  
б - с применением алгоритма подавления автоколебаний

### Заключение

Таким образом, используя программный определитель частоты входного сигнала и фактическую величину рассогласования по положению в качестве переменных состояния можно реализовать адаптивный контур подстройки составляющей регулятора по сигналу скорости,

обеспечивающий автоматический подбор оптимальных коэффициентов регулятора с учётом требований по динамическим характеристикам следящего электропривода и подавления режима автоколебаний.

**Литература**

1. Борцов Ю.А. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. Ленинград: Энергоатомиздат, 1984. 214 с.

2. Ильинский Н.Ф. Автоматизация электроприводов на базе микропроцессорных средств. М.: МЭИ, 2002. 158 с.

3. Лашенов Д.П., Бурковский В.Л. Рабочие критерии снижения автоколебаний в следящих агрегатах управления исполнительными механизмами // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве. 2017. Т. 2. С. 75-77.

Поступила 12.02.2018; принята к публикации 27.03.2018

**Информация об авторах**

**Лашенов Дмитрий Павлович** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: nord\_vrn@mail.ru

**Бурковский Виктор Леонидович** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электропривода, автоматизации и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: bvl@vorstu.ru

**ALGORITHM OF SUPPRESSION OF SELF-OSCILLATIONS IN SERVO-DRIVES BASED ON DIGITAL MICROCONTROLLER REGULATOR**

**D.P. Lashchenov, V.L. Burkovskiy**

**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** a software method is proposed for suppressing self-oscillations in servomotors based on a digital microcontroller regulator. The main criteria and methods for reducing the level of self-oscillations in adaptive servo systems are considered, taking into account the nonlinearities of the characteristics of the transmission and actuating mechanisms. As an example, methods for suppressing self-oscillations in a servomotor drive with a regulator based on a digital microcontroller 1887VE4U were developed. These methods were developed and tested during the commissioning tests in the framework of batch production, as well as preliminary tests of the final product. The main criteria for the stable operation of the servo drive in the positioning mode with small changes in the control action are the minimization of backlashes in the transmission mechanism, the introduction of additional position and speed sensors and the output link of the actuator, and the adjustment of the feedback depth according to the active observer's evaluation. The use of a digital controller based on the microcontroller gives new possibilities for fine tuning of gain factors along the contours of angular position, rotation speed and acceleration with the purpose of forming the optimal control principle of the drive providing suppression of the auto-oscillation mode at constant levels of the driving signal. The software algorithm proposed in this paper is an addition to the digital microcontroller regulator and automatically adjusts the regulator coefficients on-line, taking into account the required dynamic parameters. As the initial data for determining the optimal coefficients, the rate of change of the input signal and the magnitude of the error by the position of the output link are used

**Key words:** servo drive, digital regulator, adaptive regulator, microcontroller, self-oscillations, automatic control

**References**

1. Bortsov Yu.A. "Electromechanical systems with adaptive and modal control" ("Elektromekhanicheskie sistemy s adaptivnym i modal'nym upravleniem"), Leningrad, Energoatomizdat, 1984, 214 p.
2. Il'inskiy N.F. "Automation of electric drives based on microprocessor facilities" ("Avtomatizatsiya elektroprivodov na baze mikroprocessornykh sredstv"), Moscow, MEI, 2002, 158 p.
3. Lashhenov D.P., Burkovskiy V.L. "Practical criteria of reducing of self-oscillations in follow-up actuators controlling of executive mechanisms", *New technologies in scientific research, design, management, production* (Novye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh, proektirovaniy, upravlenii, proizvodstve), 2017, vol. 2, P. 75-77.

Submitted 12.02.2018; revised 27.03.2018

**Information about the authors**

**Dmitriy P. Lashchenov**, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: nord\_vrn@mail.ru

**Viktor L. Burkovskiy**, Dr.Sci. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: bvl@vorstu.ru

УДК 621.313

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАГРУЗКИ В СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЕ В MATLAB И SCILAB

© 2018 А.П. Харченко<sup>1</sup>, Ю.С. Слепокуров<sup>2</sup>, П.А. Аверьянов<sup>1</sup>, И.Ю. Свирский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** к следящему приводу с модальным регулятором (МР) для перемещения транспортного манипулятора предъявляются такие же требования по качеству регулирования, как и к следящим приводам перемещения звеньев манипулятора. Рассматриваются двухконтурная с обратными связями по скорости и положению и одноконтурная с обратной связью по положению следящие системы. При практической реализации таких следящих систем с МР не исследованы допустимые пределы изменения статической нагрузки для устойчивого режима работы. Поиск путей устранения влияния нагрузки является целью представленных и последующих исследований следящей системы с МР. Моделирование структурных схем одноконтурной и двухконтурной следящих систем с МР реализовано в средах Matlab и Scilab. Результаты исследований двух вариантов структурных схем следящих систем позволяют сделать вывод о том, что изменение статической нагрузки в одноконтурной следящей системе приводит к колебаниям в составляющих управляемого вектора состояний X4 (напряжение) и X3 (ток или развиваемый момент) при управляющем входном сигнале формы меандра или треугольной формы. Переменная составляющая управляемого вектора состояний X2 (скорость) не изменяется. Параметры качества регулирования следящей системы, определяемые для выходного сигнала перемещение (составляющая X1), не изменяются. Изменение в заданных пределах статической нагрузки в двухконтурной следящей системе не влияет на параметры составляющих управляемого вектора X

**Ключевые слова:** одноконтурная и двухконтурная электромеханические следящие системы, структурная схема двигателя, статическая нагрузка, модальный регулятор, наблюдатель, переходная характеристика

### Введение

Для следящего привода с модальным регулятором (МР) механизма движения транспортного манипулятора существует проблема отработки формы и времени регулирования переходного процесса с изменяющейся статической нагрузкой.

Исследования следящей системы (СС) путем моделирования осуществлялись в средах Matlab и Scilab.

При моделировании СС используется структурная схема двигателя постоянного тока (ДПТ) с доступом к переменным состояниям – рис. 1.

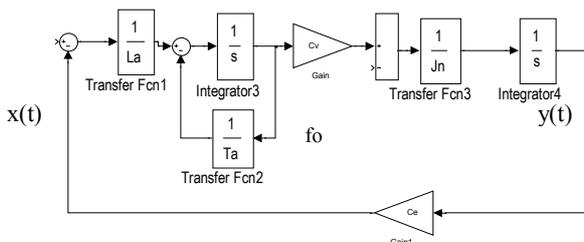


Рис. 1. Структурная схема двигателя постоянного тока в среде Matlab:

x(t) – временной входной сигнал;  
fo – статическая нагрузка;  
y(t) – временной выходной сигнал

При оценке влияния изменения статической нагрузки в автоматической системе с МР исследуется двухконтурная структурная схема СС с МР и наблюдателем согласно [1, 2] и одноконтурная СС с МР.

Структурная схема и матрицы векторно-матричного уравнения двухконтурной СС с МР описаны в [3].

Для моделирования в среде Scilab используется структурная схема одноконтурной СС с доступом к переменным состояниям управляемого вектора X – рис. 2.

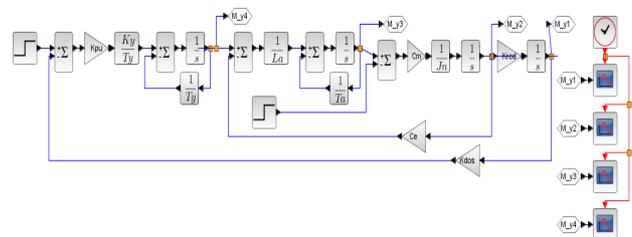


Рис. 2. Структурная схема одноконтурной СС с доступом к переменным состояниям управляемого вектора X в среде Scilab

**Постановка задачи**

С учетом структурной схемы СС с доступом к переменным состояния и матриц векторно-матричного уравнения ДПТ матрицы векторно-матричного уравнения одноконтурной СС определяются

$$A1 = \begin{pmatrix} 0 & K_{PEД} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_m/J_n & 0 \\ 0 & -C_e/L_a & -\frac{1}{T_a} & 1 \\ -K_{ДПТ} \cdot K_{ПМ} \cdot \frac{K_y}{T_y} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_y} \end{pmatrix}$$

$$B1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ K_{ПМ} \cdot \frac{K_y}{T_y} \end{pmatrix}$$

$$C1 = (1 \ 0 \ 0 \ 0), \quad D1 = 0.$$

Для расчетов одноконтурной СС с МР привода механизма движения выбраны технические характеристики ДПТ P112NM-17 итальянской компании «SicmeMotori»: номинальная мощность  $P = 4.1 \text{ кВт}$ ; номинальная частота вращения двигателя  $n = 740 \text{ об/мин}$ . Параметры ДПТ (электромагнитная постоянная времени  $T_a$ , момент инерции  $J_n$ , индуктивность  $L_a$ , коэффициенты  $C_m$  и  $C_e$ ) определяются по формулам [ 2 ].

В качестве управляющего сигнала СС используются:

входной сигнал в виде меандра: ступенчатый разгон – движение с постоянной скоростью – ступенчатое торможение;

входной сигнал в виде треугольника: линейный разгон – линейное торможение.

Динамические свойства двухконтурной следящей системы с МР, определяемые матрицей  $A = A1 - B1 * K$ , описаны в [ 3 ].

Матрица  $A$  одноконтурной СС с МР описывается

$$A = \begin{pmatrix} 0 & K_{PEД} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_m/J_n & 0 \\ 0 & -C_e \frac{1}{L_a} & \frac{1}{T_a} & 1 \\ -K_{ДПТ} \cdot K_{ПМ} \cdot \frac{K_y}{T_y} - K1 & -K2 & -K3 & \frac{1}{T_y} - K4 \end{pmatrix}$$

Обратные связи в одноконтурной СС с МР по переменным состояния  $X1, X2, X3$  и  $X4$  реализованы в ее структурной схеме с доступом к переменным состояния. Для анализа динамических показателей качества реулирования используется преобразованная структурная схема с единичной отрицательной обратной связью (ООС).

Коэффициенты  $K1-K4$  МР одноконтурной СС определялись в среде Matlab с помощью оператора `acker (A1, B1, p)`, где  $p$  - полином, определяющий требуемые корни одноконтурной СС. На рис. 3 представлена структурная схема для исследований одноконтурной СС с МР и учетом статической нагрузки  $f_0$  в среде Matlab.

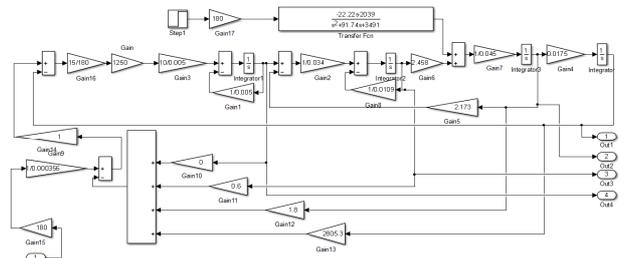


Рис. 3. Структурная схема одноконтурной СС с МР и учетом статической нагрузки  $f_0$  в среде Matlab

Величина нагрузки подается через передаточную функцию ДПТ по возмущению  $W_0(s)$ .

Матрица  $A$  одноконтурной следящей системы с МР с учетом структурной схемы ДПТ и статической нагрузки  $f_0$  описывается

$$A = \begin{pmatrix} 0 & K_{PEД} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_m/J_n - f_0 * W_0/J_n & 0 \\ 0 & -C_e \frac{1}{L_a} & \frac{1}{T_a} & 1 \\ -K_{ДПТ} \cdot K_{ПМ} \cdot \frac{K_y}{T_y} - K1 & -K2 & -K3 & \frac{1}{T_y} - K4 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 - 180 * W_0 * 1 / J_n \\ 180 * K_f * K_{dos} * K_{пв1} \cdot \frac{K_y}{T_y} - 0 \end{pmatrix}$$

На рис. 4 представлены переходные характеристики одноконтурной исходной СС и одноконтурной СС с МР при отсутствии нагрузки, время регулирования СС с МР (t=0,08-0,09 сек.) меньше в три раза времени регулирования исходной СС (t= 0,3 сек.).

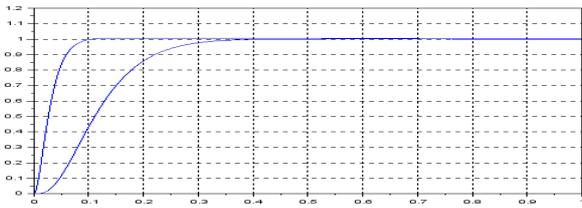


Рис. 4. Переходные характеристики одноконтурной исходной СС и одноконтурной СС с МР

На рис. 5 представлены переходные характеристики составляющих X1 и X2, переменной составляющей момента M(t) пропорциональной переменной составляющей X3, составляющей X4 управляемого вектора состояний X одноконтурной СС с МР и статической нагрузкой fo, где указано время регулирования переходной характеристики (t=0.09 сек.). Время отработки задания угла поворота 180 градусов не более 0.25 сек.

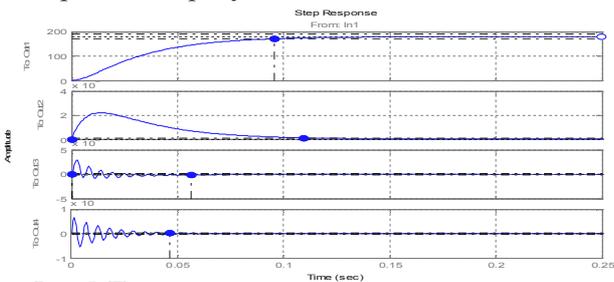


Рис. 5. Переходные характеристики одноконтурной СС с МР и статической нагрузкой:

- 1 – переходная характеристика координаты X1=y(t);
- 2 – переменная составляющая координаты X2=ω(t);
- 3 – переменная составляющая момента M(t) пропорциональная переменной составляющей координаты X3=i(t);
- 4 – переменная составляющая координаты X4=u(t)

На рис. 6-7 представлены переходные характеристики тех же составляющих управляемого вектора X СС с МР и статической нагрузкой при обработке

знакопеременного ступенчатого и треугольной формы входных сигналов.

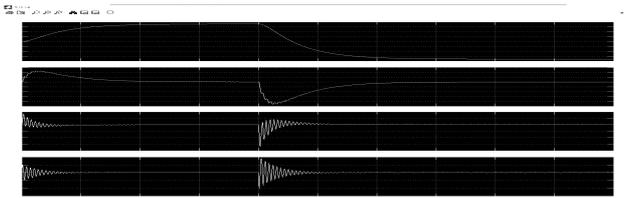


Рис. 6. Переходные характеристики одноконтурной СС с МР при отработке знакопеременного ступенчатого входного сигнала

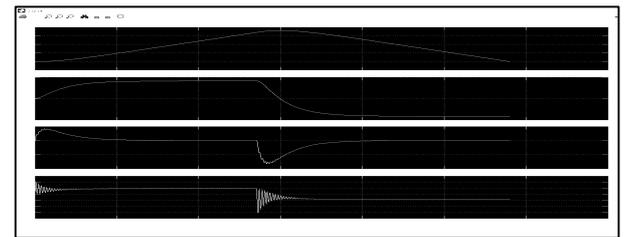


Рис. 7. Временные диаграммы одноконтурной СС с МР при отработке треугольного входного сигнала

Входные сигналы в этом случае формируются в структурной схеме с помощью блока Step и Int, а выходной сигнал наблюдается с помощью блока Scope.

Матрица A двухконтурной следящей системы с МР [3], с учетом структурной схемы ДПТ и статической нагрузки fo описывается

$$A = \begin{pmatrix} 0 & K_{ред} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Cn \cdot J_n - fo \cdot W_d \cdot J_n & 0 \\ 0 & -Ce \cdot \frac{1}{L_b} - Km_2 \cdot K_{и2} / La & \frac{1}{T_a} & 220 \cdot Km_2 \\ -K_{дп1} \cdot K_{пм} \cdot \frac{K_y}{T_y} - K1 & -K2 & -K3 & -\frac{1}{T_y} \cdot K4 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 - 180 * W_0 * 1 / J_n \\ 180 * K_f * K_{dos} * K_{пв1} \cdot \frac{K_y}{T_y} - 0 \end{pmatrix}$$

Обратные связи в двухконтурной СС с МР по переменным состояниям X1, X2, X3 и X4 реализованы с помощью наблюдателя в структурной схеме с доступом к переменным состояниям [3].

На рис. 8 представлена структурная схема для исследований двухконтурной СС с МР и наблюдателем, описанной в [3] и с учетом статической нагрузкой fo в среде Matlab.

### Выводы

1. Изменение статической нагрузки  $f_0$  в одноконтурной СС с МР, с жесткой обратной связью по положению не влияет на устойчивость, не нарушает ее работоспособность и не изменяет параметры качества регулирования.

2. При отработке знакопеременного ступенчатого сигнала и сигнала треугольной формы в одноконтурной СС с МР пульсации переменной составляющей момента  $M(t)$  увеличиваются (отсутствуют), а переменной составляющей  $u(t)$  увеличиваются.

3. Изменение статической нагрузки в двухконтурной СС с МР и с наблюдателем при подаче статической нагрузки не изменяет параметры качества регулирования.

### Литература

1. Теория автоматического управления: методы исследования автоматических систем в среде Matlab: учеб. пособие / А.П. Харченко, Ю.С. Слепокуров, В.В. Кольцова, О.В. Белоусова. Воронеж: ВГТУ, 2012. 201 с.
2. Теория автоматического управления: Синтез САУ в среде Matlab: учеб. пособие [Электронный ресурс] / А.П. Харченко, Ю.С. Слепокуров, А.К. Муконин, П.А. Аверьянов. Воронеж: ВГТУ, 2017. 80 с.
3. Харченко А.П., Слепокуров Ю.С., Аверьянов П.А. Синтез САУ в среде Matlab // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. Вып. 4. С. 7-12.

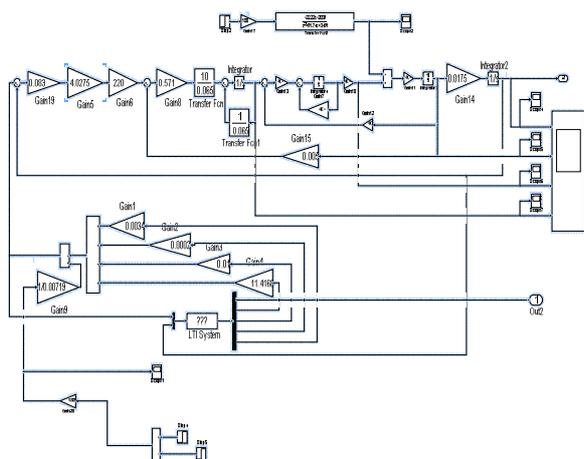


Рис. 8. Структурная схема двухконтурной СС с МР, наблюдателем и учетом статической нагрузки  $f_0$  в среде Matlab

На рис. 9 представлены переходные характеристики тех же составляющих управляемого вектора  $X$  двухконтурной СС с МР, наблюдателем и статической нагрузкой при отработке знакопеременного ступенчатого входного сигнала.

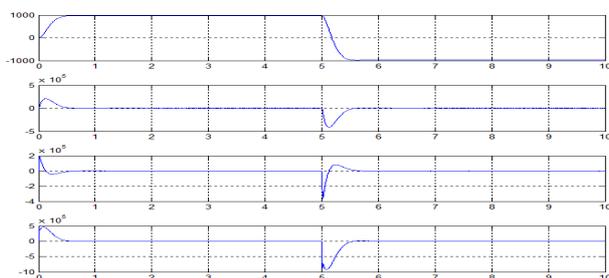


Рис. 9. Переходные характеристики двухконтурной СС с МР, наблюдателем и статической нагрузкой при отработке знакопеременного ступенчатого входного сигнала

Поступила 25.01.2018; принята к публикации 29.03.2018

### Информация об авторах

**Харченко Александр Петрович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электропривода, автоматизации и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: N210713@yandex.ru

**Слепокуров Юрий Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации и вычислительной техники, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, Солнечная 29Б, ), e-mail: ussrs@list.ru

**Аверьянов Павел Алексеевич** – бакалавр, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: p.a.aver@mail.ru

**Свирский Игорь Юрьевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: ig.svirsky@gmail.com

## INVESTIGATION OF THE LOAD INFLUENCE IN THE FOLLOW-UP SYSTEM IN MATLAB AND SCILAB

A.P. Kharchenko<sup>1</sup>, Yu.S. Slepokurov<sup>2</sup>, P.A. Aver'yanov<sup>1</sup>, I.Yu. Svirskiy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>International Institute of Computer Technology, Voronezh, Russia

**Abstract:** to the follower drive with the modal controller (MC) for moving the transport manipulator, the same requirements are imposed on the quality of regulation as to tracking drives for moving the links of the manipulator. We consider a two-loop system with feedbacks on speed and position and a single-loop servo system with feedback on position. In the practical implementation of such tracking systems with MC, the permissible limits of static load variation for a stable operating mode have not been investigated. The search for ways to eliminate the influence of the load is the goal of the presented and subsequent studies of the tracking system with MC. Simulation of structural circuits of single-loop and two-loop servo systems with MC is implemented in the Matlab and Scilab environments. The results of investigations of two variants of the structural circuits of servomechanisms allow us to conclude that a change in the static load in a single-loop servo system leads to oscillations in the components of the controlled state vector X4 (voltage) and X3 (current or developed torque) with a control input waveform of a meander or a triangular form. The variable component of the controlled state vector X2 (velocity) does not change. Parameters of the quality of control of the servo system, determined for the output signal, the movement (component X1) do not change. A change in the specified limits of the static load in a two-loop servo system does not affect the parameters of the components of the controlled vector X

**Key words:** single-circuit and two-loop electromechanical servo system, motor block diagram, static load, modal controller, observer, transient response

### References

1. Kharchenko A.P., Slepokurov Yu.S., Kol'tsova V.V., Belousova O.V. "Theory of automatic control: methods of researching automatic systems in the Matlab environment. Manual" ("Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: metody issledovaniya avtomaticheskikh sistem v srede Matlab"), Voronezh, Voronezh State Technical University, 2012, 201 p.
2. Kharchenko A.P., Slepokurov Yu.S., Mukonin A.K., Aver'yanov P.A. "Theory of automatic control: a Synthesis of ACS in the Matlab environment. Manual" ("Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: sintez SAU v srede Matlab: ucheb. posobie"), Voronezh, Voronezh State Technical University, 2017, 80 p.
3. Kharchenko A.P., Slepokurov, Yu.S., Aver'yanov P.A. "Synthesis of ACS in the Matlab environment", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudartvennogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 4, pp. 7-12.

Submitted 25.01.2018; revised 29.03.2018

### Information about the authors

**Aleksander P. Kharchenko**, Cand. Sci. (Economics), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospect, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: N210713@yandex.ru

**Yuriy S. Slepokurov**, Cand. Sci. (Technical), Associate Professor, International Institute of Computer Technologies (29B Solnechnaya, Voronezh 394026, Russia), e-mail: ussr@list.ru

**Pavel A. Averyanov**, BA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospect, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: p.a.aver@mail.ru

**Igor' Yu. Svirskiy**, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospect, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: ig.svirsky@gmail.com

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ СИЛИКАГЕЛЯ В АППАРАТЕ С ЦЕНТРОБЕЖНЫМ ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ

© 2018 А.А. Надеев, А.В. Бараков, В.Ю. Дубанин, А.Ю. Андреев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** среди всех аппаратов, применяемых для сушки дисперсных материалов, особое место занимают аппараты с псевдоожигенным слоем. Они обладают высокой интенсивностью межфазного теплообмена, небольшим гидравлическим сопротивлением и, как правило, имеют малые габариты и простую конструкцию. Это позволяет им решать одну из важнейших задач любой отрасли промышленности – обеспечение энергосбережения. Представлена опытная сушильная установка периодического действия с центробежным псевдоожигенным слоем, предназначенная для сушки трудновысыхающих и высоковлажных дисперсных материалов. Рассмотрены её конструкция и принцип действия. Приведена и описана схема экспериментального стенда. Проведена первая (предварительная) серия экспериментов по сушке дисперсных материалов. В качестве объекта сушки использовался силикагель, применяемый при осушке воздуха и промышленных газов. Приведены экспериментальные данные в виде временных зависимостей начальных и конечных параметров теплоносителя (воздуха) и силикагеля. Проведено сравнение процесса его сушки при температуре теплоносителя от 40 до 60 °С. На основании проведённого анализа опытных данных подтверждена работоспособность сушилки и сделан вывод о высокой интенсивности протекающего в ней процесса теплообмена

**Ключевые слова:** сушилка, псевдоожигенный слой, дисперсный материал, силикагель, теплоноситель, экспериментальное исследование

### Введение

Одним из наиболее энергозатратных теплотехнологических процессов в различных отраслях промышленности является сушка твёрдых материалов. Отдельным их классом являются дисперсные материалы, составляющие значительную часть продукции химической, строительной промышленности и сельского хозяйства. Для получения сухого дисперсного продукта обычно применяют конвективную сушку двух видов – в плотном стационарном слое и во взвешенном состоянии [1]. Наибольшее распространение получили аппараты, реализующие сушку второго вида, так как газ в этом случае используется не только в качестве теплоносителя (сушильного агента), но и в качестве транспортирующего агента. Среди таких аппаратов особый интерес представляют сушилки с псевдоожигенным слоем. В основном они применяются для сушки зерна, хлебопекарных дрожжей, сахара, семян, а также песка, силикагеля, различных полимеров и др. [2].

Сушилки с псевдоожигенным слоем разнообразны по конструкции и принципу действия, но в каждой из них происходит интенсивный тепло- и массообмен между дисперсным материалом и теплоносителем, обуслов-

ленный большой поверхностью контакта фаз и высокой теплопроводностью слоя [1-3]. Тем не менее перед конструкторами всегда стояла задача интенсификации этих процессов, что актуально и в настоящее время.

Один из способов интенсификации процесса теплообмена в псевдоожигенном слое был предложен и подробно рассмотрен в работах [4, 5] применительно к регенеративным теплообменным аппаратам и абсорберам. Он заключается в организации центробежного слоя, частицы которого движутся с высокой скоростью вдоль кольцевого канала. В данной работе приводятся результаты применения данного принципа для периодической сушки дисперсных материалов.

### Описание экспериментальной установки

Сушильная установка с центробежным псевдоожигенным слоем представляет собой аппарат периодического действия с вертикальной подачей теплоносителя. Её схема представлена на рис. 1, а общий вид – на рис. 2. Данный аппарат предназначен для сушки различных дисперсных материалов диаметром от 1 до 5 мм, не подверженных комкованию. Периодиче-

ский режим работы позволяет высушивать высоковлажные и трудновысыхающие материалы.

Основным элементом сушилки является рабочая камера 1, образованная внешней цилиндрической обечайкой диаметром 0,4 м и внутренней конической обечайкой с диаметром основания 0,2 м. Высота рабочей камеры составляет 0,4 м. Во внутренней обечайке выполнены пересыпные окна для подачи влажного материала в рабочую камеру из загрузочного патрубка 2. Из разгрузочных патрубков 3, оснащённых перегородками, осуществляется выгрузка высушенного материала. Свежий теплоноситель подаётся в рабочую камеру через входной участок, выполненный в виде диффузора 4, а отработанный – отводится в атмосферу через выходной участок 5.

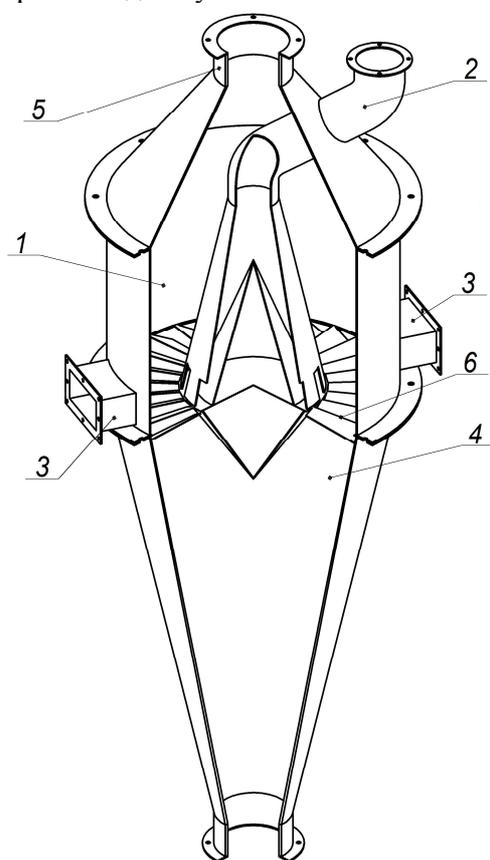


Рис. 1. Схема экспериментальной сушилки с центробежным псевдооживленным слоем: 1 - рабочая камера; 2 - загрузочный патрубок; 3 - разгрузочный патрубок; 4 - входной участок; 5 - выходной участок; 6 - газораспределительное устройство

В качестве газораспределительного устройства 6 в аппарате используется жалюзийная решётка, изготовленная из листового железа (рис. 3). Лопатки решётки имеют угол

наклона к горизонтальной плоскости  $24^\circ$ . Для исключения провала частиц и более равномерного псевдооживления она покрывается металлической сеткой с живым сечением 55 %. Подробные характеристики газораспределительных решёток, применяемых для формирования центробежного слоя, приведены в работе [6].



Рис. 2. Общий вид сушилки периодического действия с центробежным псевдооживленным слоем

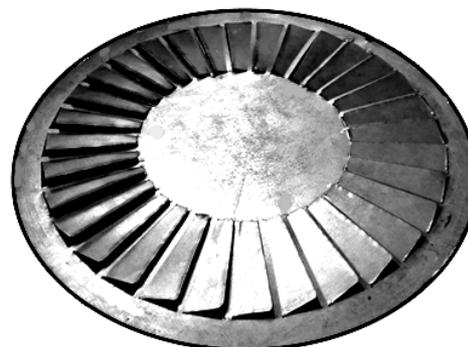


Рис. 3. Общий вид газораспределительного устройства (вид на лопатки снизу)

Предлагаемая сушилка с центробежным псевдооживленным слоем имеет малые габариты, простую конструкцию и обладает незначи-

тельным гидравлическим сопротивлением, которое согласно [4, 7] для аппаратов данного типа составляет от 200 до 500 Па. Интенсификация теплообмена осуществляется за счёт воздействия на частицы центробежных сил [4, 8]. Однако применение данного технологического принципа оправданно только для «тонких» псевдооживленных слоёв, толщиной не более 0,1 м [4, 5].

### Описание экспериментального стенда

Схема экспериментального стенда для исследования процесса сушки в аппарате с центробежным псевдооживленным слоем представлена на рис. 4. В качестве теплоносителя в сушилке 1 используется атмосферный воздух, подаваемый в неё центробежным вентилятором 2 типа Ц10-28 №4 через воздухопровод 3 диаметром 0,1 м. Вентилятор имеет номинальную производительность 3500 м<sup>3</sup>/ч и обеспечивает избыточное давление воздуха 4,5 кПа. Его производительность регулируется преобразователем частоты 5 типа Delta VFD150E43A. Выброс отработанного воздуха в атмосферу осуществляется через воздухопровод 4.

Нагрев воздуха осуществляется электрокалорифером 6 типа СФОЦ-25/0,5-И1, максимальная мощность которого составляет 23,6 кВт. Регулирование мощности, потребляемой калорифером, производится автотрансформатором 7 типа РНО-250-5. При номиналь-

ных значениях производительности вентилятора и мощности электрокалорифера температура воздуха достигает 85 °С.

Скорость теплоносителя измеряется с помощью термоанемометра 8 типа ТТМ-2/4-06, преобразователь ТТМ-2-04 которого помещён в канал воздуховода. Следует отметить, что термоанемометром измеряется локальная скорость теплоносителя в поперечном сечении воздуховода, которая затем пересчитывается в его расход.

Температура теплоносителя измеряется термоэлектрическими преобразователями 9 типа ТП-2088, а относительная влажность - канальными датчиками влажности 10 Siemens QFM2101. Они установлены в воздуховоде перед сушилкой, после неё и перед вентилятором. Температура материала фиксируется с помощью малоинерционного ТЭП, помещённого в специальную «ловушку» 11, изготовленную по рекомендациям [9]. В качестве вторичного прибора к датчикам температуры и влажности используется измеритель-регулятор 12 ОВЕН ТРМ138. Связь между ним и персональным компьютером 14 осуществляется с помощью преобразователя интерфейсов 13 типа АС4. Значения датчиков фиксируются в SCADA-системе Owen Process Manager.

Влагосодержание проб дисперсного материала определяется с помощью анализатора влажности ЭВЛАС-2М.

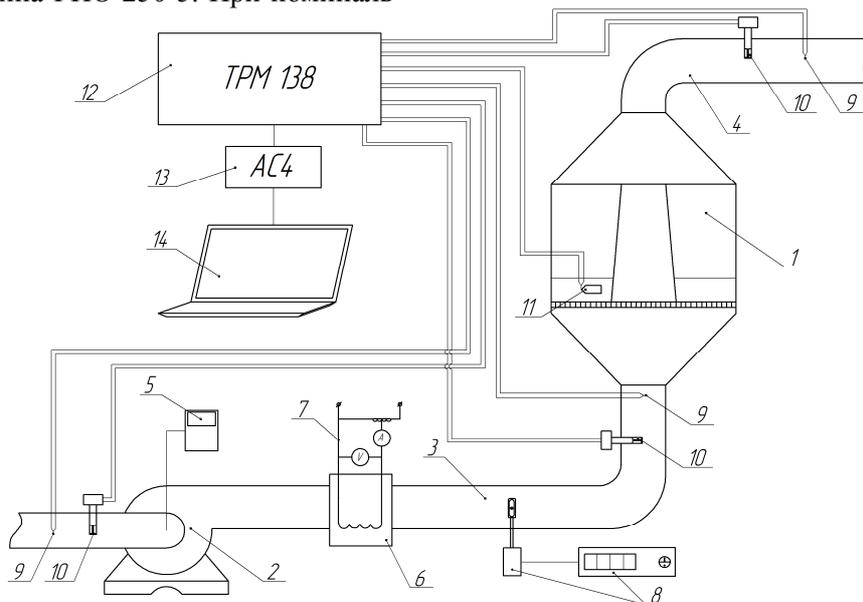


Рис. 4. Принципиальная схема экспериментального стенда: 1 - сушилка; 2 - вентилятор; 3, 4 - воздухопроводы; 5 - частотный преобразователь; 6 - электрокалорифер; 7 - автотрансформатор; 8 - термоанемометр с преобразователем; 9 - термодары; 10 - датчики влажности; 11 - «ловушка»; 12 - измеритель-регулятор; 13 - преобразователь интерфейсов; 14 - ПК

**Экспериментальное исследование процесса сушки**

Для проверки работоспособности сушилки испытательного стенда и оценки интенсивности протекающего в ней процесса теплообмена была проведена первая (предварительная) серия экспериментов. В качестве объекта сушки использовался силикагель с диаметром частиц от 2,2 до 2,5 мм. Его регенерация, согласно [10], осуществляется при температуре 180...200 °С, однако в работе [11] отмечено, что в установках с высокой интенсивностью теплообмена регенерацию силикагеля целесообразно проводить уже при температуре 40 °С. Таким образом, температура теплоносителя на входе в рабочую камеру  $t'_2$  поддерживалась в диапазоне от 40 до 60 °С (верхняя граница ограничена условиями эксплуатации датчиков влажности). Точность поддержания температуры составляла  $\pm 2$  °С.

Остальные параметры режима сушки изменялись в следующих пределах: масса материала в рабочей камере  $M_m = 1$  кг; скорость теплоносителя на входе в рабочую камеру  $v_2$  - от 2,0 до 2,6 м/с; начальное влагосодержание силикагеля  $u_n = 0,25; 0,32; 0,53; 0,82$  кг/кг; высота псевдоожиженного слоя  $H = 0,024; 0,021; 0,018; 0,015$  м.

Время проведения опытов во всех режимах составляло 30 минут. При этом в Owen Process Manager с периодичностью в 10 секунд фиксировались температура и относительная влажность теплоносителя: на всасывающей стороне вентилятора -  $t_{20}$ , °С и  $\phi_0$ , %; перед рабочей камерой -  $t'_2$ , °С и  $\phi'$ , %; после рабочей камеры -  $t''_2$ , °С и  $\phi''$ , %. Для измерения температуры силикагеля  $t_m$ , °С применялась «ловушка» 10 (рис. 4), с помощью которой производилось изъятие небольших проб материала ( $\tau = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25$  и 30 минут). Затем пробы помещались в анализатор влажности для определения текущего значения влагосодержания  $u$ , кг/кг.

По полученным экспериментальным данным были построены временные зависимости вышеперечисленных величин, основными из которых являются кривые сушки  $u = f_1(\tau)$  и нагрева  $t_m = f_2(\tau)$  дисперсного материала [12].

Для проверки методики проведения эксперимента для каждого режима опыт повторяли не менее трёх раз, при этом отклонение результатов измерений  $\delta$  составило от 3 до 11 %. Было замечено, что при повторных опытах значительное влияние на результат измерений оказывает влажность воздуха в лаборатории.

Полученные временные зависимости для режима  $t'_2 = 50$  °С,  $v_2 = 2,2$  м/с,  $u_n = 0,32$  кг/кг представлены на рис. 5.

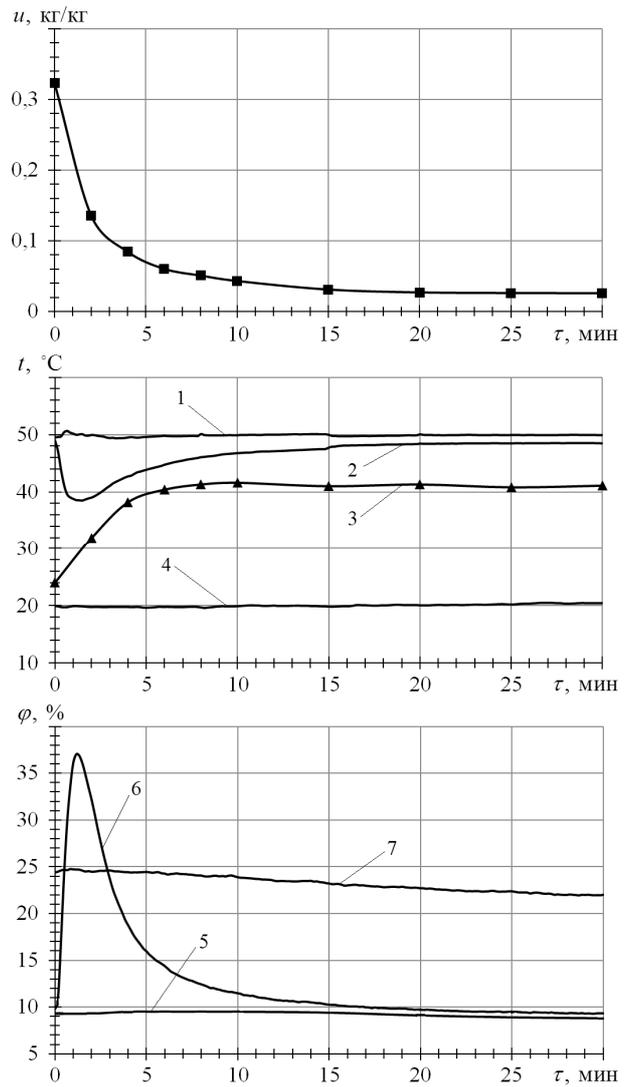


Рис. 5. Процесс сушки силикагеля при  $t'_2 = 50$  °С,  $v_2 = 2,2$  м/с,  $u_n = 0,32$  кг/кг: 1 -  $t'_2$ ; 2 -  $t''_2$ ; 3 -  $t_m$ ; 4 -  $t_{20}$ ; 5 -  $\phi'$ ; 6 -  $\phi''$ ; 7 -  $\phi_0$

Из рис. 5 видно, что при этом режиме сушки силикагель достигает равновесного с воздухом влагосодержания  $u_p = 0,026$  кг/кг к 15-й минуте процесса. Зависимости  $t''_2 = f_3(\tau)$  и

$\varphi'' = f_4(\tau)$  демонстрируют единовременный минимум и максимум, отражающие максимальное насыщение воздуха водяным паром.

Кривая сушки имеет стандартный вид и позволяет выделить два периода – первый (период постоянной скорости сушки) и второй (период падающей скорости сушки) [12]. Критическое влагосодержание материала  $u_{кр}$ , соответствующее переходу первого периода сушки во второй, при данном режиме составляет 0,12 кг/кг.

Из рис. 5 следует, что температура материала растёт до 10 минут с последующим её постоянством до окончания процесса сушки. Это не характерно для капиллярно-пористых тел, к которым относится силикагель [1, 12], и требует дальнейшего изучения.

На рис. 6 - 9 приведено сравнение кривых сушки и нагрева силикагеля и конечных параметров теплоносителя для следующих режимов:  $v_2 = 2,6$  м/с,  $u_n = 0,82$  кг/кг,  $t'_2 = 40$  °С (1),  $t'_2 = 50$  °С (2),  $t'_2 = 60$  °С (3).

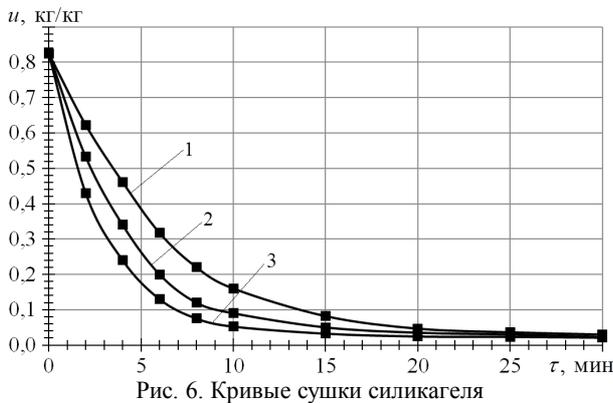


Рис. 6. Кривые сушки силикагеля

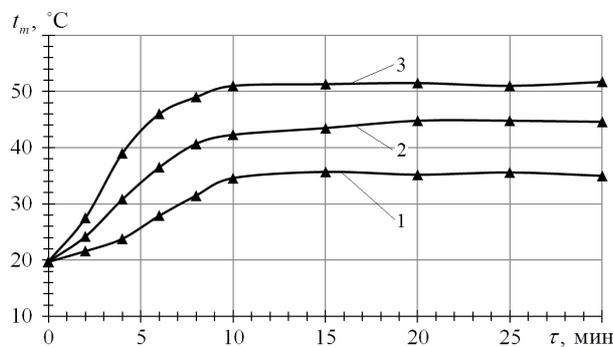


Рис. 7. Кривые нагрева силикагеля

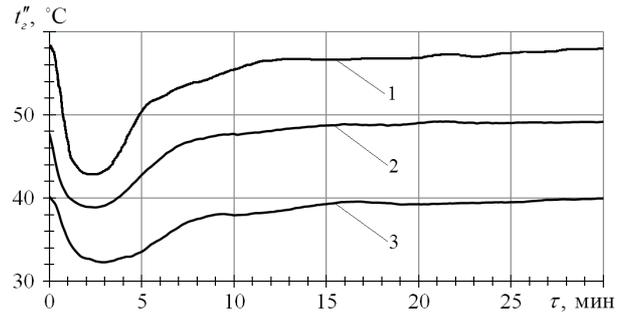


Рис. 8. Температура воздуха на выходе из сушилки

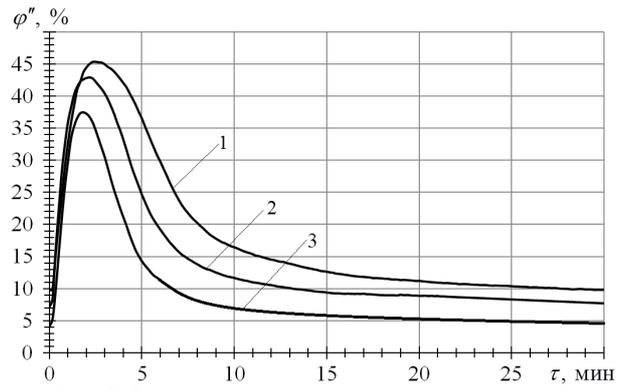


Рис. 9. Влажность воздуха на выходе из сушилки

Из данных зависимостей видно, что при увеличении температуры теплоносителя возрастает интенсивность удаления влаги из материала. При этом критическое и равновесное влагосодержания имеют следующие значения: при  $t'_2 = 40$  °С  $u_{кр} = 0,28$  кг/кг,  $u_p = 0,042$  кг/кг; при  $t'_2 = 50$  °С  $u_{кр} = 0,38$  кг/кг,  $u_p = 0,036$  кг/кг; при  $t'_2 = 60$  °С  $u_{кр} = 0,46$  кг/кг,  $u_p = 0,024$  кг/кг. На рис. 9 также прослеживается совпадение значений конечной влажности воздуха, характерное для начальных этапов всех исследованных режимов сушки силикагеля.

### Заключение

Из полученных опытных данных можно сделать вывод, что разработанная установка позволяет осуществлять процесс низкотемпературной сушки силикагеля и других дисперсных материалов. При его максимальной начальной влажности  $u_n = 0,82$  кг/кг и минимальной температуре теплоносителя 40 °С процесс сушки занимает приблизительно 25 минут, в то время как в промышленности рекомендуемая температура регенерации достигает 200 °С.

Результаты проведённых экспериментальных исследований позволяют произвести вери-

фикацию математической модели, представленной в работах [13, 14] и могут быть использованы при проектировании сушилок с псевдооживленным слоем.

Методика исследования позволяет получить надёжные данные, однако для облегчения анализа кривых сушки и нагрева материала требуется увеличение числа проб с интервалом в 1 мин. для первого периода сушки и 2-3 мин. для второго. Это будет учтено во второй серии экспериментов, посвящённых исследованию процесса сушки других дисперсных материалов и уточнению полученных данных для силикагеля.

#### Литература

1. Муштаев В.И., Ульянов В.М. Сушка дисперсных материалов. М.: Химия, 1988. 352 с.
2. Романков П.Г., Рашковская Н.Б. Сушка во взвешенном состоянии. Л.: Химия, 1968. 360 с.
3. Gibilaro L.G. Fluidization Dynamics. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. 256 p.
4. Оценка гидравлического сопротивления и межфазного теплообмена в центробежном псевдооживленном слое / Ю.Н. Агапов, А.В. Бараков, А.В. Жучков, А.В. Санников // Химическая промышленность. 1986. Т. 63. № 4. С. 61-63.
5. Фалеев В.В., Бараков А.В. Исследование межфазного теплообмена в регенеративном теплообменнике с дисперсной насадкой // Промышленная энергетика. 2003. № 6. С. 35-37.
6. Экспериментальное сравнение газораспределительных устройств для формирования центробежного слоя / Д.Ю. Агапов, А.А. Надеев, К.Н. Родионов, В.Г. Стогней, И.Ю. Клейников // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 7-1. С. 118-121.
7. Бараков А.В., Дубанин В.Ю., Прутских Д.А. Исследование гидродинамики регенератора с дисперсной насадкой // Энергосбережение и водоподготовка. 2009. № 1. С. 47-48.
8. Агапов Ю.Н., Медведев Д.И. Экспериментальное исследование теплообмена в центробежном псевдооживленном слое // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2003. № 7.3. С. 153-158.
9. Комиссаров В.М., Рехвиашвили Э.Р. Исследование квазистационарного теплообмена во вращающемся регенеративном воздухоподогревателе с шаровыми насадочными элементами // Инженерно-физический журнал. 1984. Т. 46. № 5. С. 790-796.
10. Малкин Л.Ш., Колин В.Л. Осушка и очистка малых холодильных машин. М.: Лёгкая и пищевая промышленность, 1982. 149 с.
11. Pramuang S., Exell R.H.B. The regeneration of silica gel desiccant by air from a solar heater with a compound parabolic concentrator // Renewable Energy. 2007. V. 32. Is. 1. P. 173-182.
12. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
13. The asymptotic solution of model equations for heat capacities of fluidized bed phases / A.V. Barakov, A.P. Byrdin, V.Yu. Dubanin, A.A. Nadeev // Journal of Physics: Conference Series. 2017. № 891. P. 012325.
14. Бырдин А.П., Надеев А.А., Сидоренко А.А. Анализ одной модели процессов обмена в движущихся фазах дисперсной системы // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, учёных. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. С. 68-72.

Поступила 09.02.2018; принята к публикации 29.03.2018

#### Информация об авторах

**Надеев Александр Александрович** – канд. техн. наук, старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: alekn85@mail.ru

**Бараков Александр Валентинович** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и промышленной теплоэнергетики, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pt\_vstu@mail.ru

**Дубанин Владимир Юрьевич** – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: shadow842003@mail.ru

**Андреев Артем Юрьевич** – магистр, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: aayurevich@gmail.com

### EXPERIMENTAL STUDY OF THE SILICA GEL DRYING PROCESS IN THE APPARATUS WITH CENTRIFUGAL FLUIDIZED BED

A.A. Nadeev, A.V. Barakov, V.Yu. Dubanin, A.Yu. Andreev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** among all apparatuses used for the drying of dispersed materials, a special place is occupied by apparatuses with fluidized bed. They have a high intensity of interphase heat and mass transfer, small hydraulic resistance and, as a rule, have small dimensions and simple construction. This allows them to solve one of the most important tasks of any industry - energy saving. This paper presents an experimental batch dryer with a centrifugal fluidized bed, which is designed for drying hard-drying and high-moisture dispersed materials. Its construction and operating principle are considered. The scheme of the experimental stand is given and described. The first (preliminary) series of experiments on the dispersed materials drying were carried out. The object of drying is silica gel, used for drying air and industrial gases. Experimental data in the form of time dependences of initial and final parameters of heat carrier (air) and silica gel are presented. Comparison of the process of its drying at heat carrier temperature from 40 to 60 °C is made. On the base of the performed analysis of the experimental data, the operability of the dryer was confirmed and the conclusion was drawn about the high intensity of the heat and mass transfer process

**Key words:** dryer, fluidized bed, dispersed material, silica gel, heat carrier, experimental study

### References

1. Mushtaev V.I., Ul'yanov V.M. "Drying of dispersed materials" ("Sushka dispersnykh materialov"), Moscow, Khimiya, 1988, 352 p.
2. Romankov P.G., Rashkovskaya N.B. "Drying in suspension" ("Sushka vo vzveshennom sostoyanii"), Leningrad, Khimiya, 1968, 360 p.
3. Gibilaro L.G. "Fluidization Dynamics", Oxford, Butterworth-Heinemann, 2001, 256 p.
4. Agapov Yu.N., Barakov A.V., Zhuchkov A.V., Sannikov A.V. "Evaluation of hydraulic resistance and interphase heat transfer in a centrifugal fluidized bed", *Chemical Industry (Khimicheskaya promyshlennost')*, 1986, vol. 63, no. 4, pp. 61-63.
5. Faleev V.V., Barakov A.V. "Investigation of interphase heat transfer in a regenerative heat exchanger with dispersed packing elements", *Industrial energy (Promyshlennaya energetika)*, 2003, no. 6, pp. 35-37.
6. Agapov D.Yu., Nadeev A.A., Rodionov K.N., Stogney V.G., Kleynikov I.Yu. "Experimental comparison of gas distribution devices for the formation of a centrifugal fluidized bed", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 7-1, pp. 118-121.
7. Barakov A.V., Dubanin V.Yu., Prutskikh D.A. "Investigation of the hydrodynamics of a regenerator with dispersed packing elements", *Energy saving and water treatment (Energoberezhenie i vodopodgotovka)*, 2009, no. 1, pp. 47-48.
8. Agapov Yu.N., Medvedev D.I. "Experimental study of heat transfer in a centrifugal fluidized bed", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2003, no. 7.3, pp. 153-158.
9. Komissarov V.M., Rekhviashvili E.R. "Investigation of quasi-stationary heat transfer in rotating regenerative air-heater with spherical packing elements", *Journal of Engineering Physics and Thermophysics (Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal)*, 1984, vol. 46, no. 5, pp. 790-796.
10. Malkin L.Sh., Kolin V.L. "Drying and cleaning of small refrigerating machines" ("Osushka i ochild'nykh mashin"), Moscow, Lyegkaya i pishchevaya promyshlennost', 1982, 149 p.
11. Pramuang S., Exell R.H.B. "The regeneration of silica gel desiccant by air from a solar heater with a compound parabolic concentrator", *Renewable Energy*, 2007, vol. 32, is. 1, pp. 173-182.
12. Lykov A.V. "Theory of drying" ("Teoriya sushki"), Moscow, Energiya, 1968, 472 p.
13. Barakov A.V., Byrdin A.P., Dubanin V.Yu., Nadeev A.A. "The asymptotic solution of model equations for heat capacities of fluidized bed phases", *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, no. 891, p. 012325.
14. Byrdin A.P., Nadeev A.A., Sidorenko A.A. "Analysis of a model of the exchange processes in the moving phases of dispersed system", *Energy and resource saving in heat power engineering and the social sector: Proc. of the Int. Sci. and Tech. Conf. of students, graduate students, scientists (Energ- i resursoberezhenie v teploenergetike i sotsial'noy sfere: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov, uchyenykh)*, Chelyabinsk, Publishing Center of South Ural State University, 2013, pp. 68-72.

Submitted 09.02.2018; revised 29.03.2018

### Information about the authors

**Aleksander A. Nadeev**, Cand.Sci. (Technical), Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovsky prospect, Voronezh 394026, Russia), e-mail: alekn85@mail.ru

**Aleksander V. Barakov**, Dr.Sci. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovsky prospect, Voronezh 394026, Russia), e-mail: pt\_vstu@mail.ru

**Vladimir Yu. Dubanin**, Cand.Sci. (Technical), Associate Professor, Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovsky prospect, Voronezh 394026, Russia), e-mail: shadow842003@mail.ru

**Artem Yu. Andreev**, MA, Voronezh State Technical University (14 Moskovsky prospect, Voronezh 394026, Russia), e-mail: aayurevich@gmail.com

## ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

© 2018 В.П. Поваров

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассмотрена интеллектуальная система принятия решений в условиях управления потенциально опасными объектами атомной энергетики. Предлагаемая система относится к классу советующих и не принимает конечных решений в случае отклонения анализируемых параметров, а формирует ряд альтернативных решений для персонала производственного предприятия. В качестве математического аппарата в статье использован аппарат нечеткой логики и адаптивная нечетко-нейронная сеть. Накопленный опыт эксплуатации объектов атомной энергетики показывает, что существуют критические элементы (узлы, зоны, сварные соединения), склонные к повышенной повреждаемости в условиях действия высоких эксплуатационных нагрузок, в том числе непроектных, и негативного влияния окружающей среды. Обычно в такой ситуации возникает опасность нарушения целостности оборудования при работе энергоблока на мощности с появлением серьезного дефекта, например, течи теплоносителя и перспективой развития исходного сквозного дефекта до критических размеров, т.е. все это выливается в то, что конечный наблюдаемый результат всегда один - образование и развитие эксплуатационной трещины, представляющей собой угрозу конструкционной целостности рассматриваемого элемента и, как следствие, появляется серьезная угроза безопасности работы ядерного блока. Предлагаемая ситуационная модель связана с явной базой знаний, в которой хранятся сформированные ситуации

**Ключевые слова:** система принятия решений, множественная регрессия, атомная энергетика

*Стимул технического прогресса — наша беззащитность перед техникой.  
Карл Краус*

### Введение

Неизбежно, двигаясь по пути технического прогресса, человек подвергает себя все большей опасности. История атомной энергетики, не смотря на высочайшие требования безопасности производства, знает немало катастроф. После каждого происшествия вводятся новые правила и нормы безопасности, обязательные для всех объектов атомной энергетики в мире. Таким образом, ценой человеческих жизней и судеб проходят «уроки» совершенствования систем безопасности и отказоустойчивости. Как следствие, отметим, что технологическое производство, как правило, развивается быстрее, чем необходимые для его анализа и прогнозирования опасных и критических ситуаций системы.

Современные математические методы позволяют производить точное моделирование самых сложных процессов, анализировать возможные критические ситуации в процессах, пути и меры их предотвращения. Эти меры значимы на протяжении всего жизненного цикла производственного объекта, но особенно на стадии его проектирования. Так как именно на этом этапе можно добиться значительного повышения безопасности объекта без

существенного увеличения его стоимости. Обычно уровень опасности объекта, функционирующего в штатном, предусмотренном проектом режиме, несравненно ниже уровня опасности, который представляет объект в условиях аварийной ситуации.

Если проанализировать различные аварии на особо опасных объектах, можно выделить ряд общих причин: ошибки в проектах, неправильные решения о месте постройки объекта и режимах его эксплуатации, недооценка подготовки персонала, халатность и беспечность. Но анализ случившихся аварий не решает всех проблем. Необходимо не только находить «слабые звенья» в технологических цепочках, но и прогнозировать, как будут развиваться события, вызванные аварией на опасных производственных объектах, формировать решения, необходимые для минимизации риска.

В системах ядерной энергетики цена ошибки может быть слишком высока и для минимизации рисков предлагается реализовать интеллектуальную систему принятия решений на основе аппарата нечеткой логики с использованием прогнозирующего ANFIS-подобного модуля.

Структура предлагаемой системы представлена на рис. 1.

### Система непрерывного многопараметрического мониторинга состояния объекта ядерной энергетики

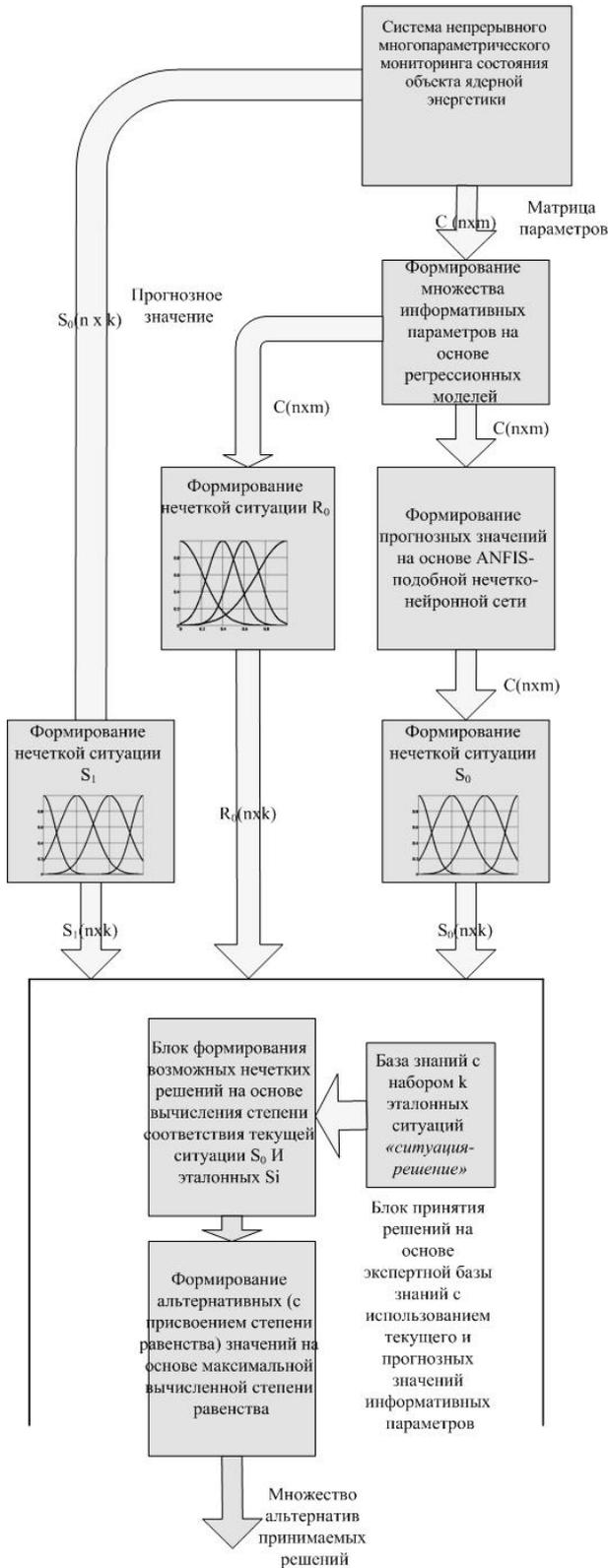


Рис. 1. Обобщенная структура интеллектуальной системы принятия решений

Система является источником информативных параметров для интеллектуальной системы принятия решений. Учитывая то, что к настоящему времени большинство действующих реакторных установок АЭС работают с продленным сроком эксплуатации, оценка остаточного ресурса ответственного оборудования и конструкций является актуальной проблемой. В качестве основных причин, сокращающих ресурс, рассматриваются непроектные нагрузки и накопления повреждений в элементах оборудования с учетом исходной дефектности и деградации механических свойств материалов. Постоянный мониторинг наиболее эксплуатационно-нагруженного оборудования позволяет установить и отследить все непроектные нагрузки, приводящие в свою очередь к развитию эксплуатационных дефектов выше допустимого уровня с потерей герметичности. Если в процессе эксплуатации не происходит повреждения, для обоснования безопасной эксплуатации достаточно соблюдения требований отраслевых нормативных документов по проведению периодического неразрушающего контроля материалов, а также прочностных расчетов по допускаемым напряжениям.

Время до разрушения есть функция трех параметров: напряженно-деформированного состояния (НДС), свойств материала и свойств среды в зоне повреждения. Сложный характер взаимодействия этих параметров не позволяет в большинстве случаев предсказать начало и динамику эксплуатационного повреждения.

Поскольку на лабораторных моделях невозможно воспроизвести фактические напряжения и параметры среды в зоне повреждения, следовательно, нельзя рассчитать остаточный ресурс оборудования с необходимой точностью. Оценка фактического уровня НДС в зоне разрушения оборудования определяется конструкционными особенностями и технологическими параметрами эксплуатации. Поэтому оценку термосиловой нагруженности можно воспроизвести только на самом оборудовании. Это первый постулат, лежащий в основе данной системы. Второй постулат -

верификация расчетной модели по экспериментальным данным для корректного прочностного расчета. Третий постулат разработанной системы - непрерывный мониторинг дефектности в наиболее нагруженных зонах оборудования с контролем температур, деформаций, перемещений.

Мониторинг дефектности позволяет «привязать» историю эксплуатации к моменту дефектообразования для установления причинно-следственных связей, приводящих к разрушению, а также контролировать развитие дефектов до опасного уровня.

### Формирование множества информативных параметров на основе регрессионных моделей

При анализе реальных параметров технических и технологических объектов нередко появляется проблема неполноты информации. Возможные причины – сбой датчиков, отказ запоминающего устройства, электромагнитные наводки на системах контроля и связи. Предлагается использовать регрессионную модель для восстановления зависимых от времени информативных параметров. То есть в момент анализа параметров данный блок распознает неполноту входного вектора и после получения регрессионной модели формирует дополнительное значение.

На вход данного блока поступает матрица значений информативных параметров размерностью  $[n \times m]$ . Каждый параметр, в свою очередь, зависит от дискретного времени поступления данных в систему многопараметрического мониторинга, а также имеет корреляцию с другими параметрами системы. В интеллектуальной системе принятия решений предлагается реализовать формирование регрессионной поверхности для аппроксимации и восстановления информативных параметров. На рис. 2а показан пример входных данных от системы многопараметрического мониторинга. На рис. 2б – возможная регрессионная поверхность, полученная для восстановления утерянных информативных данных.

Соответствующую математическую задачу называют многомерной регрессией, или, более точно, многооткликовой регрессией (multiresponce regression). По сравнению с

методом наименьших квадратов обычной одномерной регрессии оценка параметров множественной регрессии в общем случае усложняется, так как приходится одновременно оценивать параметры регрессионной зависимости и ковариационную матрицу случайных ошибок.

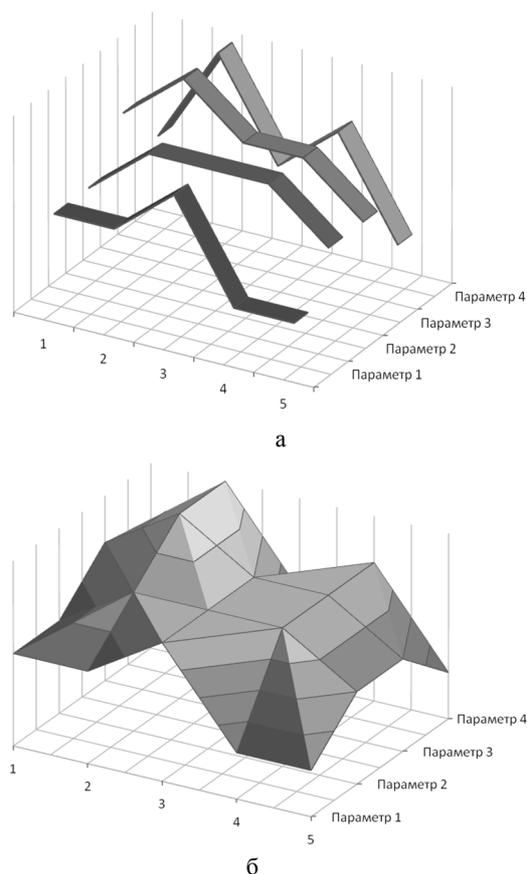


Рис. 2. Реализация многомерной регрессии

### Блок прогнозирования

Предлагается использовать ANFIS-подобную нечетко-нейронную сеть для формирования прогнозных значений информативных параметров интеллектуальной системы принятия решений в объектах атомной энергетики. При наличии типовой структуры с продукционными правилами, блоком принятия решений и нечетким выводом Такаги-Сугено предлагается при обучении сети использовать характеристики информативных данных. А именно рассчитываемые в предыдущем функциональном блоке восстановления данных коэффициенты регрессии.

**Блок принятия решений**

Разработанный блок ситуационной модели включает в себя три основных составляющих:

- блок оценки состояний (фаззификация);
- блок принятия решений;
- блок выдачи выходного воздействия (дефаззификация).

Вводятся две лингвистические переменные для входного и выходного потоков информативных данных:

$$X_i < \text{«Уровень информативного параметра»}, T_x, [0, P_i] >, \\ Y_i < \text{«Уровень риска возникновения ЧС»}, T_y, [0, I] >, \\ \text{где } T_x = \{ \text{«малый»}, \text{«средний»}, \text{«достаточно высокий»}, \text{«высокий»} \}, T_y = \{ \text{«низкий»}, \text{«средний»}, \text{«достаточно высокий»}, \text{«высокий»}, \text{«опасный»} \}.$$

База знаний. В случае с ситуационными моделями база знаний является ключевым блоком в принятии адекватного и оперативного решения. В работе используется статическая база знаний, в которой хранятся пары матриц типа:

- <Текущая нечеткая ситуация>;
- <Прогнозная нечеткая ситуация >;
- <Прогнозная нечеткая ситуация >;
- <Принимаемое решение >

Нечеткая ситуация представляет собой матрицу, идентичную матрице  $S_i (n \times k)$ ,  $i=1, \dots, l$ , полученной в блоке фаззификации. Составляется матрица  $S$  аналогичным образом при помощи описанного выше блока и функций принадлежности. Второй и третий элементы представляет собой вектор  $S_i (l \times k)$ ,  $i=1, \dots, l$ , полученный с помощью лингвистической переменной  $X$  и соответствующих функций принадлежности. Четвертый элемент вектора – это возможная альтернатива принимаемых решений. Таким образом, база знаний имеет явный вид и представляет собой набор записей размерностью  $(l \times 4)$ .

При формировании базы знаний использовались экспертные оценки текущего состояния анализируемых информативных параметров. Предлагается использовать степень равенства, как критерий выбора наиболее близкой ситуации из базы знаний, а

следовательно, и соответствующего ей выходного вектора  $S$ :

$$\mu(S_0, S_i) = v(S_0, S_i) \& v(S_i, S_0),$$

где  $i=1, \dots, k$ ,  $\mu$  – степень равенства нечетких ситуаций,  $v$  – степень включения нечетких ситуаций. То есть в данном блоке происходит сравнение ситуации, полученной из входных данных с эталонными ситуациями в базе знаний.

В работе предлагается использовать процедуру формирования выходного вектора  $S$  в зависимости от рассчитанных степеней равенства следующим образом:

$\mu_{\max} > 0,9$	Принимать $S$ с наибольшей степенью равенства
$0,5 < \mu_{\max} < 0,9$	Выбрать ситуации с тремя наибольшими степенями равенства и результирующее множество $S$ получить путём пересечения выбранных $S = S_{\mu_{\max}} \cap S_{\mu_{\max-i}}, i = 1, \dots, 2$
$\mu_{\max} < 0,5$	Выбрать ситуации с пятью наибольшими степенями равенства и результирующее множество $S$ получить путём пересечения выбранных $S = S_{\mu_{\max}} \cap S_{\mu_{\max-i}}, i = 1, \dots, 4$

Блок выдачи выходного воздействия. В данном блоке реализуются алгоритмы дефаззификации и на выходе формируются альтернативы принимаемых решений.

Таким образом, результатом функционирования блока выдачи выходного воздействия является группа конкретных рекомендаций, выбор которой системой зависит от текущего и прогнозного значений параметров системы.

Уровень риска возникновения ЧС	Возможные действия персонала
Низкий	Штатное расписание
Средний	Повышенное внимание к блоку
Достаточно высокий	Диагностика, замена или остановка блока
Высокий	Остановка блока, проведение ремонтных работ
Опасный	Остановка блока и выведение из эксплуатации

В работе используется метод дефаззификация по среднему центру

$$\bar{z} = \frac{\sum_{i=1}^k \mu_R(Z_i) Z_i}{\sum_{i=1}^k \mu_R(Z_i)},$$

где  $Z_i$  – точка, в которой функция  $\mu_R$  принимает максимальное значение.

Система непрерывного многопараметрического мониторинга – система может не только анализировать и формировать параметры, но и прогнозировать состояние объекта. Для повышения качества функционирования интеллектуальной системы принятия решений предлагается добавить блок сравнения прогнозных значений.

### Заключение

Повышение сложности технологического и программно-технического оборудования ведет за собой повышение рисков возникновения чрезвычайных происшествий на производствах, то есть актуальность разработок интеллектуальных систем принятия решений на объектах ядерной энергетики является

неоспоримой. Данная интеллектуальная система не только анализирует текущее состояние объекта, но и на основе формирования прогноза информативных параметров предлагает ряд альтернативных решений для минимизации риска возникновения внештатных ситуаций на особо опасных объектах атомной энергетики.

### Литература

1. Поваров В.П., Бакиров М.Б., Данилов А.Д. Программно-технический комплекс непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости оборудования ядерных энергетических установок // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 6. С. 58–63.
2. Ярушкина Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем. М.: Финансы и статистика, 2004. 320 с.
3. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика и исследование зависимостей. М.: Финансы и статистика, 1985. 487 с.
4. Гусев К.Ю., Бурковский В.Л. Нейросетевая модель прогнозирования интегральных экономических показателей // Системы управления и информационные технологии. Т. 48. № 2.1. 2012. С. 132–135.

Поступила 26.01.2018; принята к публикации 29.03.2018

### Информация об авторах

**Поваров Владимир Петрович** – канд. техн. наук, зав. кафедрой автоматизации и систем управления объектами атомной энергетики, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: tmk\_ep@mail.ru

## GENERALIZED STRUCTURE OF THE DECISION-MAKING SYSTEM IN CONDITIONS OF POTENTIALLY HAZARDOUS NUCLEAR POWER OBJECTS

V.P. Povarov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article considers the intellectual decision-making system under in conditions of potentially dangerous nuclear power facilities. The proposed system belongs to the class of consultants and does not take final decisions in case of deviation of the analyzed parameters, but forms a number of alternative solutions for the personnel of the production enterprise. The article uses a fuzzy logic apparatus and an adaptive fuzzy-neural network as a mathematical apparatus. The accumulated experience in the operation of nuclear power facilities shows that there are critical elements (nodes, zones, welded joints) that are prone to increased damage in conditions of high operational loads, including non-projected loads, and negative environmental impact. Usually in such a situation there is a danger of damage to the integrity of the equipment when the power unit is operating at a power level at the appearance of a serious defect, for example, a coolant leak and the prospect of developing an initial through-fault to critical dimensions; all these result in the fact that the final observable result is always the same - the formation and development of an operational crack that constitutes a threat to the structural integrity of the element in question and, as a consequence, there is a serious threat to the safety of the nuclear unit's operation. The proposed situational model is associated with an explicit knowledge base in which the formed situations are stored

**Key words:** decision-making system, multiple regression, nuclear power

#### References

1. Povarov V.P., Bakirov M.B., Danilov A.D. “Program-technical complex of continuous monitoring of operational damage to equipment of nuclear power plants”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol.13, no. 6, pp. 58-63.
2. Yarushkina N.G. “Fundamentals of the theory of fuzzy and hybrid systems” (“Osnovy teorii nechetkikh i gibridnykh sistem”), Moscow, Finansy i statistika, 2004, 320 p.
3. Ayvazyan S.A., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. “Applied statistics and research of dependencies” (“Prikladnaya statistika i issledovanie zavisimostey”), Moscow, Finansy i statistika, 1985, 487 p.
4. Gusev K.Yu., Burkovskiy V.L. “Neural network prediction model of integrated economic indices”, *Control systems and information technologies (Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii)*, Voronezh, Nauchnaya kniga, 2012, vol. 48, no. 2.1, pp. 132-135.

Submitted 26.01.2018; revised 29.03.2018

#### Information about the author

**Vladimir P. Povarov**, Cand.Sci. (Technical), Voronezh State Technical University (14 Moskovsky prospect, Voronezh 394026, Russia), e-mail: [tmk\\_ep@mail.ru](mailto:tmk_ep@mail.ru)

## ПРИКЛАДНЫЕ МЕТОДЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА НОВОВОРОНЕЖСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

© 2018 И.А. Колягина, А.Д. Данилов

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

**Аннотация:** статья посвящена анализу задач управления и примененных для решения этих задач инструментов, используемых на Нововоронежской атомной электростанции (АЭС) для стратегического планирования и управления достижением поставленных стратегических целей и задач за счет фокусирования системы управления предприятием на непрерывных улучшениях деятельности в точках наибольшего влияния на стратегические и производственно-экономические показатели. Рассмотрен ключевой инструмент декомпозиции целей Нововоронежской АЭС - дерево целей, с помощью которого удалось определить взаимосвязи между целями на всех уровнях управления предприятия, показателями, измеряющими достижение этих целей, и ответственностью за их достижение. Используются экономические и функциональные цели. Представление целей начинается с верхнего уровня, дальше они последовательно разукрупняются. Причем основным правилом разукрупнения целей является полнота: каждая цель верхнего уровня представлена в виде подцелей следующего уровня исчерпывающим образом, то есть так, чтобы объединение понятий подцелей полностью определяло понятие исходной цели, показатели, которые определяют возможное состояние системы, т.е. степень выполнения целевых нормативов при имеющихся временных, ресурсных или других ограничениях. Характерными примерами являются плановая выработка электроэнергии и ее фактическое значение; планируемое и фактическое время проведения ремонтов и т.д. Уровень реализации цели определяет отношение целевого показателя к целевому нормативу. Представленная логика декомпозиции в виде дерева целей может служить первичной информационной базой, которую можно использовать для расчета интегральных показателей по всему предприятию в целом и по структурным подразделениям с целью принятия эффективных решений. Реализация данного подхода на практике позволяет получить структуру организации, ориентированную целиком на выполнение стратегии и систему показателей, позволяющую наиболее адекватно оценивать эффективность ее функционирования. При этом предприятие воспринимается как система взаимосвязанных элементов, имеющих общую цель - обеспечить максимальную производительность в плане выработки электроэнергии и совершенствование системы управления АЭС

**Ключевые слова:** системный анализ, стратегия, декомпозиция, дерево целей, показатели

### Введение

Атомная отрасль России представляет собой мощный комплекс, включающий более 350 предприятий и организаций, в которых занято свыше 250 тыс. человек. В современных условиях атомная энергетика — один из важнейших секторов экономики России. Динамичное развитие отрасли является одним из основных условий обеспечения энергонезависимости государства и стабильного роста экономики страны.

В соответствии с Указом Президента РФ от 7 июля 2011 года №899 ядерная энергетика определена в качестве одного из приоритетных направлений развития науки, техники и технологий России. Развитие отечественной атомной энергетики основывается на «Энергетической стратегии России на период до 2030 г.», согласно которой предполагается увеличение производства электроэнергии на атомных электростанциях (АЭС) в 4 раза за счет строительства новых объектов,

модернизации и продления сроков службы действующих энергоблоков, а также использования инновационных технологий [1].

### Требования к стратегии управления предприятием

Указанная выше цель предъявляет новые требования к управлению предприятиями атомной отрасли, где на первое место при принятии управленческих решений выступает критерий эффективности. При этом финансовые показатели не являются адекватными монокритериями для оценки и выбора вектора стратегического развития. Они являются результатом анализа прошлого периода и не дают представления о том, какие действия необходимо предпринять в будущем для того, чтобы повысить объемы выпускаемой электрической энергии.

Пристальное внимание при этом должно уделяться методам оценки эффективности управления предприятием. Для принятия

решений в настоящее время необходимо иметь не только картину того, как работают подразделения предприятия, но и знать насколько соответствует их деятельность стратегическому направлению и в каких бизнес-процессах заметно отклонение.

Для предприятия должна быть сформулирована собственная стратегия с целью стабильного и динамичного развития компании, понимания целей и задач, реализован системный подход к построению управления, который можно охарактеризовать как специфичный способ мышления и анализа проблем организации и управления ею, что позволит обеспечивать руководство информацией о будущих проблемах и принять своевременно корректирующие меры. Кроме этого визуализация показателей должна быть разработана и соответствующим образом представлена для всех уровней специалистов в форме и объеме, которой им нужен, чтобы легко идентифицировать проблемы.

В процессе управления происходит анализ контролируемых параметров в структурных единицах организации, сравнение их с существующими нормами и целями организации, а затем осуществляется принятие управленческого решения в целях приведения параметров в соответствие с нормой. Причем информация для разработки и принятия эффективных и точных управленческих решений должна быть своевременной и достоверной.

Это диктует необходимость формирования системы мониторинга и контроля показателей, которая будет прозрачной и ясной, простой и объективной, но самое главное понятной как руководителям и работникам предприятия, так и внешним пользователям данной системы.

Исследованию проблем разработки, выбора и реализации эффективных стратегий развития хозяйствующих субъектов, системному каскадированию целей, формированию ключевых показателей эффективности предприятий, построению эффективной организационной модели, алгоритмам управления реализацией стратегии посвящено достаточно большое количество многоаспектных фундаментальных научных трудов и прикладных социально-экономических работ.

В управлении такими системами задействовано большое количество людей, громадные природные, материальные и

энергетические ресурсы. В этой связи подход к объектам управления как к сложным системам выражает одну из главных особенностей современного этапа развития общества.

Ключевой вопрос многоуровневых систем – вопрос принятия решений и координации действий вышестоящих уровней управления с нижестоящими и их взаимодействия между собой.

Умение распознать систему, декомпозировать ее на элементарные составляющие, определить законы управления каждой подсистемой и вновь синтезировать систему требует разработки ряда специальных формальных моделей, процедур, алгоритмов.

Как правило, вопросы планирования (стратегического, среднесрочного и оперативного) рассматриваются в различных документах различного уровня и детализации, что в свою очередь затрудняет глубокое понимание принципов функционирования и устройства существующей системы постановки целей, а также усложняет подготовку руководителей (программы подготовки) по вопросам постановки целей.

Общепроизводственные цели не всегда доводятся до подразделений в виде целевых показателей; не всегда поставленные цели являются измеримыми, что затрудняет оценку степени достижения поставленных целей и дальнейшее реагирование; не всегда поставленные цели являются реалистичными, такой подход не мотивирует персонал к их достижению.

Недостатки существующей системы показателей, недостаточное использование показателей при постановке целей значительно ограничивает возможности по управленческой деятельности и не позволяет в полной мере ориентироваться на достижение лучших отраслевых стандартов.

Задача стратегического управления состоит в том, чтобы трансформировать миссию компании в конкретные, осязаемые задачи и показатели. Эти показатели представляют баланс между внешними отчетными данными финансовых показателей и внутренними характеристиками наиболее значимых процессов, инноваций, обучения и роста.

Процесс планирования, формулирования задач и стратегических инициатив определяет специфические количественные показатели через сбалансированный набор результатов и

факторов, приведших к этим результатам. Сравнение желаемых результатов с получившимися демонстрирует пробел, для ликвидации которого необходимы стратегические инициативы. Таким образом, система показателей является не только набором параметров изменений, но и их пусковым механизмом.

Цифровое значение любого индивидуального показателя может и не представлять никакого значения при рассмотрении его изолированно. И в то же время значение показателя усиливается при рассмотрении его в контексте других характеристик показателя. С другой стороны, тенденции особого показателя в течение определенного времени могут дать раннее предупреждение руководству АЭС для начала проведения расследования причин наблюдаемых изменений. Помимо контроля изменений и тенденций для оценки слабых и сильных сторон характеристик необходимо также сравнить показатели с намеченными целями и задачами. Для каждой станции необходимо определить показатели, которые лучше всего для нее подходят. Подобранные показатели не должны быть статическими, а должны отвечать условиям и характеристикам станции.

Разработанная система отслеживания и мониторинга показателей должна корректироваться при изменении целей деятельности организации и системы показателей текущих планов и стратегических ориентиров [2]. Очевидно, что в полной мере данная система может быть реализована только с использованием современных информационных технологий. Развитие системы управления, в свою очередь, предусматривает наличие соответствующей информационной подсистемы поддержки принятия решений, а также мониторинг и контроль их исполнения.

Реализация данного подхода на практике позволяет получить структуру организации, ориентированную целиком на выполнение стратегии и систему показателей, позволяющую наиболее адекватно оценить эффективность ее функционирования. При этом организация воспринимается как система взаимосвязанных элементов, имеющих общую цель - обеспечить свое существование и развитие в окружающей среде. Система – это нечто целое, состоящее из неравных, но

взаимосвязанных элементов; каждый такой элемент вносит свой вклад в описание и свойства целого. Организации тоже являются системами, состоящими из людей (персонал), технологий, оборудования, финансов и т. д.

Раньше атомная промышленность рассматривала безопасность и производство, как конфликтующие между собой задачи. Однако практика эксплуатации за последние тридцать лет показала, что это не так. На деле же станции, имеющие отличные показатели по безопасности, имеют и хорошие эксплуатационные характеристики. Поэтому полный набор параметров контроля работы АЭС должен включать показатели, как по безопасности, так и по экономическим характеристикам [3].

Стратегическое планирование как процесс включает в себя три элемента:

- стратегический анализ, суть которого заключается в определении объема имеющихся ресурсов и их сопоставлении с задачами и возможностями;

- установление показателей – индикаторов достижения основной цели;

- стратегический выбор, в рамках которого формируются варианты плана, критерии выбора и осуществляются оценочные процедуры, использующие данные критерии.

В основу стратегического планирования деятельности промышленного предприятия положена процедура целеполагания, заключающаяся в установлении целей (преимущественно количественных), базирующаяся на первоначальных ожиданиях, сложившемся опыте и прогнозе требуемых ресурсов. Сложность процесса планирования определяют многочисленные факторы внутренней и внешней среды, находящиеся в состоянии неопределенности для менеджмента промышленных предприятий, а также необходимость выбора эффективного методического инструментария для планирования, выбора конкретных и измеримых показателей плана.

### **Дерево целей как инструмент декомпозиции**

Идея метода «дерева целей» впервые была предложена Черчменом в связи с проблемами принятия решений в промышленности и основана на получении иерархических структур путем последовательного разделения общей

цели на подцели, подцелей - на функции, функций - на более детальные функции [4-6].

Для операционализации стратегии и управления достижением поставленных стратегических целей и задач за счет фокусирования системы управления предприятия на непрерывных улучшениях деятельности в точках наибольшего влияния на стратегические и производственно-экономические показатели на Нововоронежской АЭС используется такой инструмент декомпозиции, как Дерево целей.

Дерево целей – структурированная, построенная по иерархическому принципу и отображенная в графическом виде совокупность декомпозированных целей и показателей, соответствующая экономической и организационной модели предприятия, позволяющая определить взаимосвязи между целями на всех уровнях управления предприятия, показателями, измеряющими достижение этих целей, и ответственностью за их достижение. Дерево целей является ключевым инструментом декомпозиции целей, определяет и визуализирует функциональный и экономический смысл деятельности предприятия и механизмы повышения эффективности деятельности в текущем периоде и в долгосрочной перспективе. Каждый из элементов содержит формулировку целей, ответственного за ее выполнение и индикатор ее достижения. Используются экономические и функциональные цели. Экономические цели - цели производственно-экономической, инвестиционной, финансовой и инновационной деятельности Нововоронежской АЭС, направленные на достижение желаемого уровня прибыльности, конкурентоспособности, производительности, экономической эффективности использования ресурсов, эффективности использования финансовых ресурсов. Имеют количественные (расчетные измеримые) показатели достижения целей, они подчиняются математической логике. При декомпозиции экономических целей применены показатели 2-х видов:

- натуральные показатели – показатели, выражающие количество материальных ценностей в натуральных единицах измерения (часы, кВт\*ч., Гкал. и т.д.);

- стоимостные показатели – показатели в стоимостном (денежном) эквиваленте. Применение стоимостных показателей помогло

обобщать характеристики затрат и результатов производства.

Функциональные цели – производные цели функциональных подразделений, обеспечивающие условия долгосрочной деятельности предприятия. К функциональным относятся цели в области обеспечения безопасности деятельности предприятия (ядерной, радиационной, экологической и т.п.), управления рисками, человеческих ресурсов (вовлеченность, квалификация, управление знаниями), организационного потенциала (качество и скорость протекания процессов, эффективность и гибкость системы управления), социальной приемлемости и ответственности. Имеют количественные и качественные показатели измерения целей. С учетом того, что при производстве электроэнергии наивысшим приоритетом является безопасность, декомпозиция целей, направленных на обеспечение безопасности отражена в Дереве целей очень подробно в разделе «Условия долгосрочной деятельности».

Декомпозиция целей и показателей выполнена вплоть до начальника цеха (отдела) с учетом того, что на различных уровнях управления решаются задачи различного характера и объема. Конкретный работник на рабочем месте получил в результате декомпозиции те цели и показатели, на которые он оказывает непосредственное влияние в своей ежедневной деятельности. При этом на уровне директора большинство показателей является стоимостными, в то время как на уровне начальника структурного подразделения используются преимущественно натуральные показатели. Декомпозиция показателей удовлетворяет следующим требованиям:

- математическая логика: декомпозиция экономических целей выполнена в математической логике с учётом иерархии (показатель верхнего уровня получается путем математических операций с показателями более низкого уровня);

- баланс натуральных и стоимостных показателей: декомпозиция целей или стоимостных показателей (рубли) доходит до уровня натуральных показателей (часы, кВт\*ч., Гкал. и т.д.);

- полнота целей и показателей: декомпозируемые элементы отражают комплексную характеристику деятельности предприятия и являются взаимно

исключительными и совместно исчерпывающими;

- сбалансированность: показатели согласованы между собой, достижение одного показателя не должно автоматически обеспечивать или исключать достижение других показателей.

Декомпозиция ответственности удовлетворяет следующим требованиям:

- соответствие структуре управления: структура Дерева целей максимально соответствует системе управления предприятием и текущему распределению полномочий. Декомпозированные сотруднику показатели соответствуют зоне его ответственности. Сотрудник отвечает за цели и показатели, на которые он оказывает непосредственное влияние, и мотивация на достижение которых стимулирует его работать на общий результат;

- одна цель – один ответственный: за каждую цель в Дереве целей назначен ответственным один руководитель в соответствии с зоной полномочий.

АО «Концерн Росэнергоатом» видит свою миссию в обеспечении потребителей электрической и тепловой энергией, произведенной на АЭС Концерна, при гарантированном обеспечении безопасности как высшего приоритета в своей деятельности [7].

Дерево целей Нововоронежской АЭС предназначено для стратегического планирования производственной деятельности предприятия с целью реализации указанной миссии и состоит из четырех частей:

- увеличения масштаба деятельности и доли рынка;
- операционная эффективность, продуктовая себестоимость, оптимизация использования ресурсов;
- новые продукты и международный бизнес;
- условия долгосрочной деятельности.

Рассмотрим более детально содержание одной из частей Дерева целей, а именно части первой: увеличение масштаба деятельности и доли рынка (рис. 1, 2).

Представление целей начинается с верхнего уровня, дальше они последовательно разукрупняются. Причем основным правилом разукрупнения целей является полнота: каждая цель верхнего уровня представлена в виде

подцелей следующего уровня исчерпывающим образом, то есть так, чтобы объединение понятий подцелей полностью определяло понятие исходной цели.

Целью верхнего уровня АО «Концерн Росэнергоатом» является увеличение масштаба деятельности и доли рынка, индикатором ее достижения служит заданная величина доли выработки АЭС в энергобалансе РФ. Нововоронежской АЭС для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи: выработку заданного объема электроэнергии (1.1); увеличение выручки от реализации теплотенергии (1.2); выполнение инвестиционной программы АО «Росэнергоатом» (в части филиала) (1.3). Эти цели являются целями второго уровня.

Выработка заданного объема электроэнергии (цель 1.1) возможна при реализации следующих целей третьего порядка:

- обеспечение плановой выработки по группам точек поставки генерации (цель 1.1.1);
- максимизация дополнительной выработки эл/энергии заданием оптимального режима работы оборудования (цель 1.1.2);
- максимизация дополнительной выработки эл/энергии при сокращении плановых ремонтов (цель 1.1.3);
- максимизация дополнительной выработки при увеличении диспетчерского графика нагрузки (цель 1.1.4);
- максимизация дополнительной выработки за счет сокращения времени протекания процессов ввода/вывода в ремонт/из ремонта генерирующего оборудования и оборудования, влияющего на выработку электроэнергии (цель 1.1.5);
- минимизация недовыработки эл/энергии по причине неправильных действий персонала (цель 1.1.6);
- исключение недовыработки эл/энергии по причине низкого качества ремонта оборудования (цель 1.1.7);
- минимизация недовыработки эл/энергии по причине нарушения в работе оборудования в части организации эксплуатации (цель 1.1.8);
- минимизация недовыработки эл/энергии по причине нарушения в работе оборудования в части низкого качества МТР (цель 1.1.9);
- минимизация отклонения мощности от планового значения (цель 1.1.10).

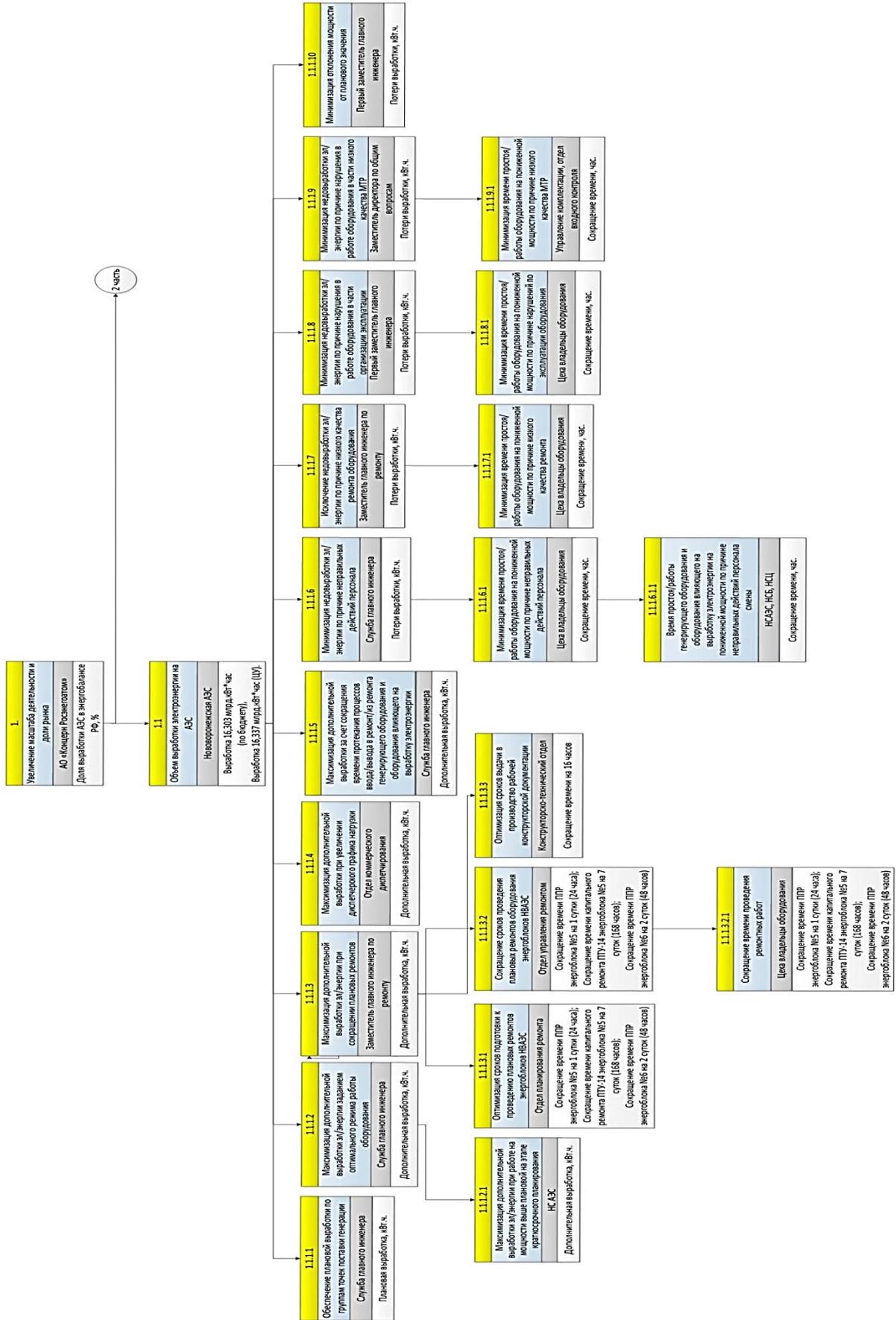


Рис. 1. Дерево цели «Увеличение масштаба деятельности и доли рынка» – часть 1

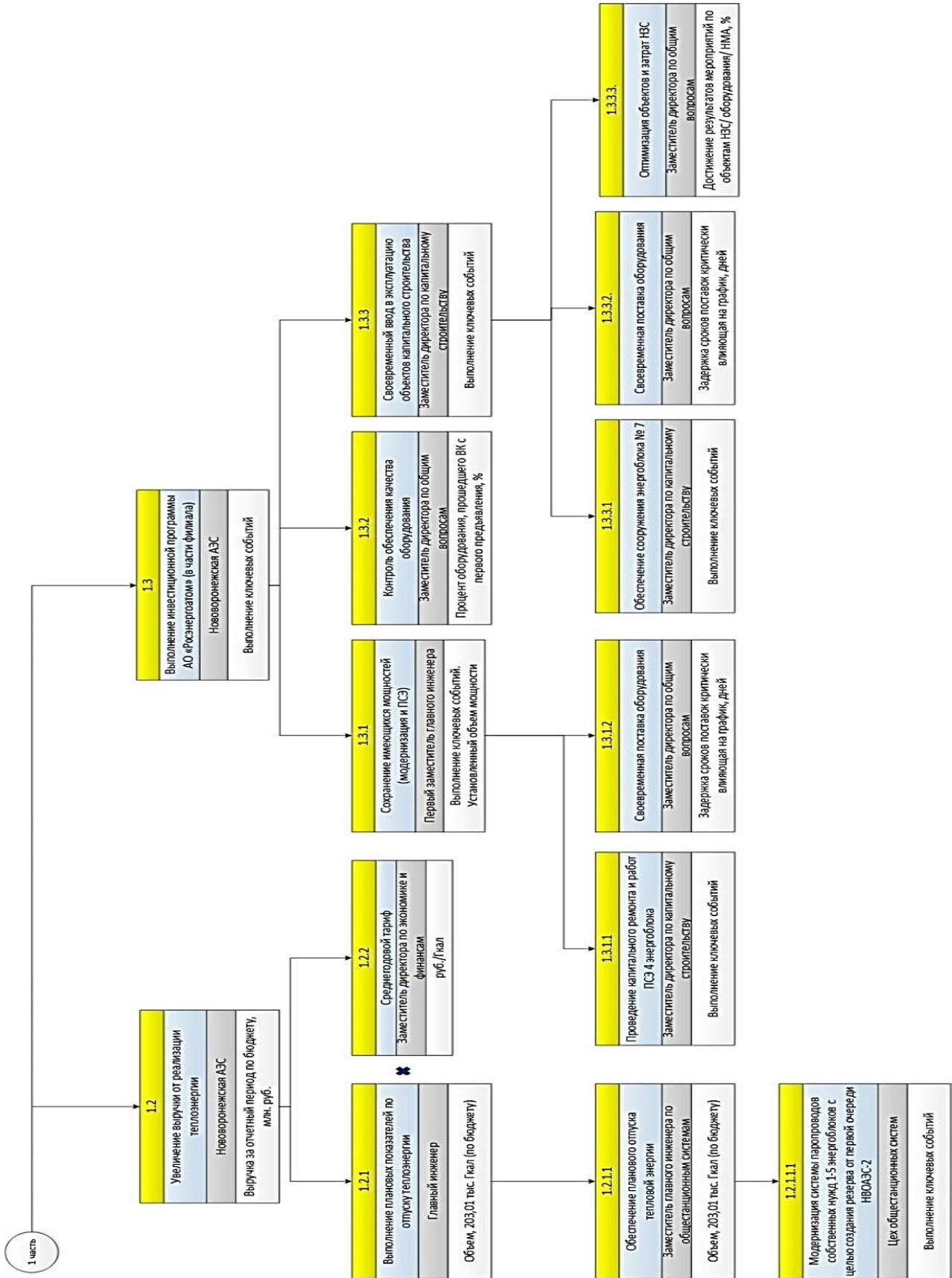


Рис. 2. Дерево цели «Увеличение масштаба деятельности и доли рынка» – часть 2

При этом ответственность за реализацию указанных целей лежит на службах главного инженера и директора. Выполнение целей 1.1.2 – 1.1.5 обеспечивает дополнительную выработку, а целей 1.1.6 – 1.1.10 минимизирует потери выработки электроэнергии.

Ответственность за реализацию целей четвертого уровня возложена на подразделения атомной станции. Так, например, максимизация дополнительной выработки эл/энергии при сокращении плановых ремонтов (цель 1.1.3) декомпозируется на три подразделения:

- оптимизация сроков подготовки к проведению плановых ремонтов энергоблоков (цель 1.1.3.1) закреплена за отделом планирования ремонта;

- сокращение сроков проведения плановых ремонтов оборудования энергоблоков (цель 1.1.3.2) - за отделом управления ремонтом;

- оптимизация сроков выдачи в производство рабочей конструкторской документации (цель 1.1.3.3) - за конструкторско-техническим отделом.

Для каждой цели определены целевые показатели, которые определяют возможное состояние системы, т.е. степень выполнения целевых нормативов при имеющихся временных, ресурсных или других ограничениях. Характерными примерами являются: плановая выработка электроэнергии и ее фактическое значение; планируемое и фактическое время проведения ремонтов и т.д. Уровень реализации цели определяет отношение целевого показателя к целевому нормативу.

### Заключение

В настоящей работе рассмотрена реализация системного подхода в виде применения инструментов декомпозиции, используемых на Нововоронежской АЭС для стратегического планирования и управления достижением поставленных стратегических целей.

С помощью Дерева целей удалось определить взаимосвязи между целями на всех уровнях управления предприятия, показателями, измеряющими достижение этих целей, и ответственностью за их достижение.

Дерево целей позволило определить и визуализировать функциональный и экономический смысл деятельности Нововоронежской АЭС и механизмы повышения эффективности деятельности в текущем периоде и в долгосрочной перспективе.

Представленная логика декомпозиции в виде Дерева целей может служить первичной информационной базой, которую можно использовать для расчета интегральных показателей по всему предприятию в целом и по структурным подразделениям, с целью принятия эффективных решений.

### Литература

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13.11.2009 г. №1715-р. Об Энергетической стратегии России на период до 2030 года // Собрание законодательства РФ. 2009. № 48. ст. 5836. 103 с.
2. Каплан Роберт С., Нортон Дейвид П. Стратегические карты. Трансформация нематериальных активов в материальные результаты. М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2005. 512 с.
3. Показатели безопасности при эксплуатации атомных станций. IAEA TECDOC 1141. МАГАТЭ, 2000. 126 с.
4. Ехлаков Ю.П. Исследование систем управления (конспект лекций). Томск: ТУСУР, 1998. 112 с.
5. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Основы системного анализа: учеб. пособие для студентов вузов. Томск: Изд-во НТЛ, 1997. 396 с.
6. Силич В.А. Декомпозиционные алгоритмы построения моделей сложных систем. Томск: изд-во Томск. ун-та, 1982. 136 с.
7. Официальный сайт АО «Концерн Росэнергоатом». Режим доступа: <http://www.rosenergoatom.ru/about/nasha-missiya/> Дата обращения 09.12.2017.

Поступила 27.01.2018; принята к публикации 29.03.2018

### Информация об авторах

**Колягина Ирина Анатольевна** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kolyaginaIA@nvnpp1.rosenergoatom.ru  
**Данилов Александр Дмитриевич** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: danilov-ad@yandex.ru

**APPLIED METHODS OF SYSTEM ANALYSIS IN PROBLEMS OF POWER PRODUCTION CONTROL AT NOVovorONEZH NOVovorONEZH NUCLEAR POWER PLANT**

**I.A. Kolyagina, A.D. Danilov**

**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** the article is devoted to the analysis of management tasks and the tools used to solve these tasks at the Novovoronezh NPP for strategic planning and management of the achievement of the strategic goals and objectives set by focusing the enterprise management system on continuous improvement of operations at the points of greatest influence on strategic and production and economic indicators. The key instrument for the decomposition of the goals of the Novovoronezh NPP is the Target Tree, through which it was possible to determine the interrelations between the objectives at all levels of enterprise management, the indicators measuring achievement of these goals, and the responsibility for achieving them. Economic and functional purposes were used. The submission of goals starts from the top level, then they are sequentially disaggregated. The main rule of disaggregation of goals is completeness: each goal of the top level is represented in the form of sub-goals of the next level in an exhaustive manner, that is, so that the unification of the notions of subgoals completely determines the concept of the initial goal, the indicators that determine the possible state of the system, i.e. the degree to which the target standards are met, given the available time, resource or other constraints. Typical examples are: planned generation of electricity and its actual value; planned and actual time of repairs, etc. The level of goal realization determines the ratio of the target to the target standard. The presented logic of decomposition in the form of a target tree can serve a primary information base that can be used to calculate integrated indicators for the whole enterprise and for structural subdivisions with the purpose of making effective decisions. Implementation of this approach in practice allows to get the structure of the organization, oriented entirely to the implementation of the strategy and the system of indicators, allowing the most adequate assessment of the effectiveness of its functioning. At the same time, the enterprise is perceived as a system of interrelated elements with a common goal - to ensure maximum productivity in terms of generating electricity and improving the management system of nuclear power plants

**Key words:** system analysis, strategy, decomposition, tree of goals, indices

**References**

1. The decree of the Government of the Russian Federation of 13.11.2009, #1715-r. On the Energy strategy of Russia for the period till 2030, The legislation of the Russian Federation, 2009, no. 48, section 5836, 103 p.
2. Kaplan R.S., Norton D.P. "Strategy maps. Transformation of the intangible assets into financial results" ("Strategicheskoye karty. Transformatsiya nematerial'nykh aktivov v material'nye rezul'taty"), Moscow, CJSC "Olimp-Biznes", 2005, 512 p.
3. "Safety indices in the operation of nuclear power plants" ("Pokazateli bezopasnosti pri ekspluatatsii atomnykh stantsiy"), IAEA TECDOC 1141, 2000, 126 p.
4. Ekhlakov Y.P. "Study of control systems" ("Issledovanie sistem upravleniya"), Tomsk, TUSUR, 1998, 112 p.
5. Peregudov F.I., Tarasenko F.P. "Fundamentals of system analysis. Manual for students." ("Osnovy sistemnogo analiza: Ucheb. posobie dlya studentov vtuzov"), Tomsk, NTL, 1997, 396 p.
6. Silich V.A. "Decomposition algorithms of constructing models of complex systems" ("Dekompozitsionnye algoritmy postroyeniya modeley slozhnykh sistem"), Tomsk, Izdatel'stvo Tomskogo Universiteta, 1982, 136 p.
7. Official site of JSC "Concern Rosenergoatom", available at: <http://www.rosenergoatom.ru/about/nasha-missiya>

Submitted 27.01.2018; revised 29.03.2018

**Information about the authors**

**Irina A. Kolyagina**, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovsky prospect, Voronezh 394026, Russia), e-mail: [kolyaginaIA@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:kolyaginaIA@nvnpp1.rosenergoatom.ru)

**Aleksander D. Danilov**, Dr. Sci. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovsky prospect, Voronezh 394026, Russia), e-mail: [daniilov-ad@yandex.ru](mailto:daniilov-ad@yandex.ru)

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВЗАИМНОГО ТЕПЛООБМЕНА  
В ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОННЫХ МЕХАНИЗМАХ**

© 2018 А.И. Борисова, В.Л. Бурковский

**Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** предлагается подход к анализу функциональной напряженности высокоресурсного микроконтроллерного электромеханотронного комплекса интегрированной конструкции, используемой в космических аппаратах негерметизированного исполнения при повышенной тепловой напряженности. Анализируются специфические особенности теплообмена при широтно-импульсной модуляции на несущей частоте в контуре «контроллерный электронный преобразователь – исполнительный электромеханизм», энергетические зависимости в контурах цифровой механотронной системы и их влияние на тепловые физические процессы с учетом отсутствия конвекционного теплообмена и локальных эксплуатационных эффектов согласно матрице критических реакций структурно-функциональных составляющих на факторы живучести, стойкости, долговечности; интерактивные алгоритмы последующего топологического и конструктивно-модульного проектирования агрегата на основе математического моделирования тепловых процессов интегрированного конструктива при ограниченных объемах конфигурации в объектовую среду с оптимизацией массораспределения и тепловых потоков. Показана пренебрежительная малость конвективной составляющей теплопроводности с преимуществом «кондуктивно-радиационного» охлаждения интегрированных механотронных конструкций

**Ключевые слова:** энергетические зависимости, конвекционный теплообмен, интегрированный конструктив, стойкость, теплопроводность

**Введение**

В современных комплексах автоматического управления различными системами летательных аппаратов негерметизированных исполнений, работающих в условиях глубокого разрежения, невесомости, солнечного излучения, точность выполнения ими заданных программ регламентируется уровнями соответствия «частота вращения – качество динамических характеристик – задающее воздействие». Развитие таких систем идет по пути совершенствования цифровой механотронной микросистемной техники (ЦММТ) на основе технологий и методов частотно-импульсной модуляции на несущей частоте в условиях структурированного проблемного поля функциональной напряженности высокоресурсного вакуумно-микроконтроллерного электротехнического агрегата интегрированной конструкции, при отсутствии конвекционного обмена, с повышенной тепловой напряженностью.

**Методы**

В факторе единства организации теплозащиты с учетом первичных соотношений:

1) теплопроводностью (контактное):

$$q_{\theta_1} = \frac{Q_{\theta}}{S_{\theta}} = \frac{\lambda_{\theta}}{b} (\theta_1 - \theta_2), \tag{1}$$

где  $Q_{\theta}$  – количество тепла, переносимое тепловым потоком;

$S_{\theta}$  – теплопроводящая поверхность, через которую протекает тепловой поток;

$\lambda_{\theta}$  – коэффициент теплопроводности, характеризующий свойства материала стенки;

$b$  – толщина стенки;

$\theta_1, \theta_2$  – температура по обеим сторонам стенки.

2) конвекцией (естественная):

$$q_{\theta_2} = \frac{Q_{\theta}}{S_{\theta}} = \alpha_{\theta} (\theta_1 - \theta_2), \tag{2}$$

где  $\alpha_{\theta}$  – коэффициент теплообмена.

3) излучением (радиацией):

$$q_{\theta_3} = \frac{Q_{\theta}}{S_{\theta}} \varepsilon_{\mu} C_0 \left[ \left( \frac{\theta_{1K}}{100} \right)^4 - \left( \frac{\theta_{2K}}{100} \right)^4 \right], \tag{3}$$

где  $\varepsilon_{\mu}$  – относительная излучающая способность, или степень черноты, материала тела;  $C_0$  – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела;

$\theta_{1K}$  – абсолютная температура поверхности охлаждаемого тела, К;

$\theta_{2K}$  – абсолютная температура окружающей среды, К.

Эффективное матмоделирование тепловых соотношений, часто связанное с неопределенностью физических процессов, требует и совокупности тепловых экспериментов на имитационных моделях. При этом в процессе теплообмена электромеханотронных движителей (ЭМТД) актуальны все виды теплозащит – кондуктивный, конвективный и излучением, которые обеспечивают отвод тепла до 30% потребляемой мощности ЦММТ (при КПД≤70%). Электромеханический узел ЭМУ, являясь основным ядром механической активности систем, локально через несущий корпус интегрируется с его поверхностью и определяет одну из составляющих циклограммы общего тепловыделения за контролируемый период [1].

Оценка величины энергопоступлений от ЭМУ определится соотношением:

$$Q_{\text{пос}} = K \sum_{i=1}^n N_i (1 - h_i) \quad , \quad (4)$$

где К – коэффициент электромагнитного единства;

N – магнитная составляющая.

Одним из наиболее важных вопросов стойкости при управлении характеристиками такой аппаратуры является установление рациональных зависимостей в тепло-энергетических соотношениях гетерогенных его составляющих.

Реакция исполнительных «электромеханика-силовая электроника» на последовательность равновеликих по длительности прямоугольников питающего напряжения «1-0» -I<sub>г</sub>, сформированных трехфазным микроконтроллерным регулятором, рационально определяется на участках π/3 решением соответствующих дифференциальных уравнений с использованием метода преобразований Лапласа и принципа наложения, с учетом степени возбужденности и самоиндукции активных составляющих, условий непрерывности фазовых токов и дополнительных аппаратных потерь -ΔP<sub>А</sub>:

$$i_1 = \frac{U_{n1}}{3r} \left[ 1 - \frac{2+a-a^2}{1+a^3} e^{-\beta t} \right] - \frac{E}{\sqrt{r^2 + x_c^2}} \cdot \sin(\omega t - \theta - \theta_{\max}), \quad (5)$$

$$i_2 = \frac{U_{n1}}{3r} \left[ 2 - \frac{(1+a)^2}{1+a^3} \cdot e^{-\beta t} \right] - \frac{E}{\sqrt{r^2 + x_c^2}} \cdot \sin(60^\circ + \omega t - \theta - \theta_{\max}), \quad (6)$$

$$i_3 = \frac{U_{n1}}{3r} \left[ 1 - \frac{1-a-2a^2}{1+a^3} \cdot e^{-\beta t} \right] - \frac{E}{\sqrt{r^2 + x_c^2}} \cdot \sin(120^\circ + \omega t - \theta - \theta_{\max}); \quad (7)$$

при среднем значении тока и мощности в цепи источника питания: [2]

$$P_{\text{ИП}} = I_{\text{ИП}} \cdot v_{\text{П}} \quad (8)$$

$$I_{\text{ИП}} = \frac{2U_n}{3r_H} \cdot \left[ 1 - 3f\tau_H \frac{(1-a^2)(1+a)}{1+a^3} \right] - \frac{3}{\pi} \frac{E}{\sqrt{r^2 + x_c^2}} \cos(\theta + \theta_{\max}), \quad (9)$$

Средняя мощность P<sub>AV</sub>, потребляемая ЦММТ от источника постоянного тока - U<sub>n</sub>, как базовый критерий его теплофизических процессов, определится соотношением [1]:

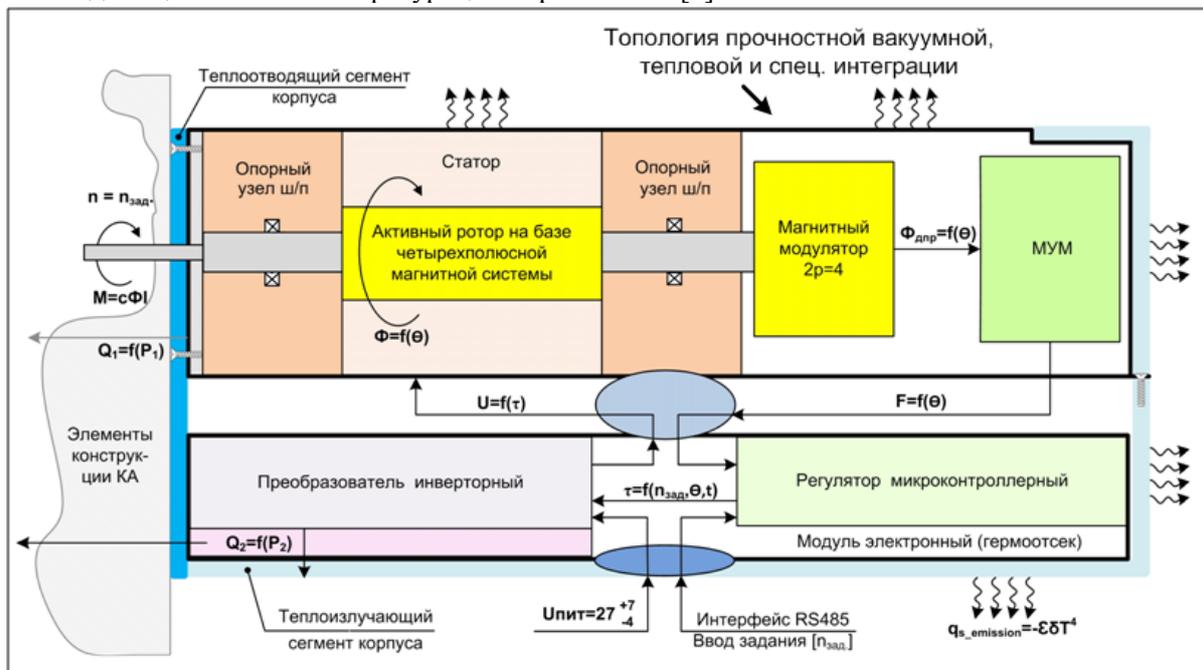
$$Q_{\text{ИП}} = K \sum_{i=1}^n N_i (1 - \eta_i) = P_{\text{AV}} = I_{\text{cp.u.n.v}} \cdot U_n + \Delta P_A = \frac{U_n^2}{3r} \cdot \left\{ K \cdot \left[ 2 - 2e^{-\beta_0(1-\gamma'_v)} + \frac{v}{n_u} \frac{(e^{\beta_0 \gamma'_v} - 1)}{(e^{\beta_0} - 1)} \cdot \frac{(1 - e^{-\beta_0 \frac{n_u}{v}})^2}{1 + e^{-3\beta_0 \frac{n_u}{v}}} \right] \right\} - \frac{3}{\pi} \cdot \frac{E_0 \cdot U_n \cdot K_E}{\sqrt{r^2 + x_c^2 v^2}} \cdot \cos \left[ \frac{\pi v}{6n_u} (1 - \gamma'_v) + \theta_v + \theta_{\max v} \right] \cdot \frac{\sin \frac{\pi v}{6n_u} \cdot \gamma'_v}{\sin \frac{\pi v}{6n_u}} + \Delta P_A \quad (10)$$

Энергетическая математическая модель ЦММТ, алгоритмы управления ее балансом и программные средства «прошивки» микроконтроллера, учитывающие локальные эксплуатационные эффекты, в сочетании с матрицей критической реакции структурно-функциональных сборочных составляющих на факторы живучести и их стойкости к максимуму термовоздействий, являются интерактивной базой для последующего топологического проектирования и конструктивно-модульной архитектуры электротехнического агрегата – ЭТА на основе математического моделирования

тепловых процессов интегрированного конструктива. При этом электромеханизм ЦММТ частью своего объема конфигурируется в объектовую среду, позволяя оптимизировать необходимые размерности массораспределения и рационализировать потоки тепла на корпусные элементы негерметизированного космического аппарата (кондуктивная часть) при развитии диффузионных возможностей лучистого теплообмена.

Проекционный подход к решению задач такого теплообмена с решением чисто геометрических задач ограничивается сложностью протекания электромагнитных процессов в элементах с разнофизическими свойствами, а также трудностями учета совокупностей сборочных единиц сложной конфигурации при

наличии взаимных затемнений элементов поверхностей, что приводит к необходимости новых подходов их решения на принципах математического моделирования с использованием ЭВМ. В этих условиях особенности теплового проблемного поля ЦММТ, прежде всего, связаны с необходимостью сохранений теплового баланса активных частей электромеханики и электронной составляющей, ограничиваемые недостаточностями теплоизлучающих процессов в вакуум-климатических условиях эксплуатации при недопустимостях воздействия этих факторов на отдельную номенклатуру ЭКБ, требующих введения внутренне дискретных энергетических оптимизаторов и ступенчатых герметизаторов интегрированного конструктива [3].



**Выводы**

Исследователями отмечается, что контактное охлаждение успешно при ограниченных размерах изделия ( $Q \leq 700 \text{ см}^3$ ,  $p \leq 3 \text{ кг}$ ), когда мощность рассеивания уточняется только коэффициентами вакуумной напряженности 30 Вт. Конвекционное (воздушное) охлаждение потоками сопровождается тепловыми градиентами, при которых, кроме температуры и внутренней архитектуры изделия, его эффективность определяется площадью и качеством поверхности внешних стенок и корпуса с практической зависимостью (т.е. до  $0,25 \text{ Вт/см}^2$ ). Однако разряжение существенно снижает эффект

от конвекции, с доведением до уровня охлаждения измерением  $q_{03} \leq 0,3q_{01}$  с суммарным эффектом теплозащиты конструкции, выраженным соотношением:

$$\sum q_{\theta} = q_{\theta 1} + 0,3q_{\theta 2} + 0,4q_{\theta 3} \quad (11)$$

Такая модель предполагает совмещение всех дестабилизирующих факторов, влияющих на выбор конструктивных мер обеспечения надежности и, прежде всего (кроме теплозащиты), влаго- и трибостойкости, механической и радиационной прочности, долговечности в условиях солнечных излучений и магнитных полей земли. Обоснование системосхемотехнических и конструктивно-технологических ре-

шений при разработке агрегатированных ЦММТ с гетерогенными составляющими, направленных на достижение единства противоположностей «долговечность-давление» при рациональном развитии микросистемных особенностей и архитектурных инвариациях единого моноблока, формируется благодаря критериям теории подобия (по базовым аналогам).

#### Литература

1. Борисова А.И., Бурковский В.Л. Анализ плотности температурных режимов механотронной аппаратуры в

негерметизированных электротехнических комплексах // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 6. С. 87-89.

2. Борисова А.И., Кузнецов Э.Г. Энергетические аспекты широтно-модулированно синхронного электродвигателя // Мир механотроники. 2016. № 5. С. 32.

3. Борисова А.И., Бурковский В.Л. Математическая модель энергетических соотношений, определяющих теплофизические процессы в электротехнических комплексах вакуумного исполнения // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве. 2017. Т. 2. С. 23.

Поступила 12.02.2018; принята к публикации 29.03.2018

#### Информация об авторах

**Борисова Алина Игоревна** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: alinka\_borisova93@mail.ru

**Бурковский Виктор Леонидович** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электропривода, автоматизации и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: bvl@vorstu.ru

### MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF MUTUAL HEAT EXCHANGE IN ELECTROMECHANOTRONIC MECHANISMS

A.I. Borisova, V.L. Burkovskiy

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the paper proposes an approach to the analysis of the functional tension of a high-resource microcontroller electromechanotronic complex of an integrated design used in spacecrafts of unsealed construction with increased thermal tension. Specific features of heat transfer are analyzed for pulse width modulation on the carrier frequency in the circuit "controller electronic converter-executive electromechanism", energy dependencies in the circuits of the digital mechatronic system and their influence on thermal physical processes, taking into account the absence of convection heat exchange and local operational effects according to the matrix of critical reactions of structural-functional components to factors of vitality, durability, longevity; interactive algorithms for the subsequent topological and constructive-modular design of the unit based on mathematical modeling of thermal processes of the integrated design with limited volumes of configuration in the object environment with optimization of mass distribution and heat flows. Convective component of thermal conductivity with the advantage of "conductive radiation" cooling of integrated mechatronic structures is shown to be negligibly small

**Key words:** power dependences, convection heat exchange, integrated construct, heat conductivity

#### References

1. Borisova A.I., Burkovskiy V.L. "The analysis of density of temperature conditions of mechatronic equipment in unsealed electrotechnical complexes", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2016, vol. 12, no. 6.

2. Borisova A.I., Kuznetsov E.G. "Energy aspects of the timely modulated synchronous motor", *The world of mechatronics (Mir mekhanotroniki)*, 2016, no. 5.

3. Borisova A.I., Burkovskiy V.L. "Mathematical model of energy relationships determining thermophysical processes in electrotechnical complexes of vacuum execution", *New technologies in scientific research, design, management, production (Novye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh, proektirovani, upravlenii, proizvodstve)*, 2017, vol. 2.

Submitted 12.02.2018; revised 29.03.2018

#### Information about the authors

**Alina I. Borisova**, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovsky prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: alinka\_borisova93@mail.ru

**Victor L. Burkovskiy**, Dr.Sci.(technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovsky prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: bvl@vorstu.ru

## ОЦЕНКА ГИДРОТЕРМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПАКТНОГО ПОРИСТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

© 2018 В.И. Ряжских, Д.А. Коновалов, А.Ю. Трошин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** определены гидротермические характеристики при вынужденном однофазном течении охладителя через пористый компактный теплообменный элемент в 3D-постановке. Синтезированы новая математическая модель, основанная на гидродинамической модели Дарси-Бринкмана-Форчгеймера в модификации Ксу-Ченга, и тепловая на основе модели Шуммана. Линеаризация уравнений математической модели позволила последовательно получить точное аналитическое решение сначала гидродинамической задачи, а затем тепловой. На основе полученного точного аналитического решения гидродинамической и тепловой задач определены коэффициент гидродинамического сопротивления канала, заполненного пористой средой, длина гидродинамического начального участка, температуры пористого каркаса и охладителя, рассчитаны числа Нуссельта. На примере расчета реальной конструкции пористого компактного теплообменника наглядно проиллюстрировано влияние начальных параметров на гидротермические характеристики и выявлены ключевые закономерности. Установлено существенное влияние диаметра частиц пористого каркаса на гидравлическое сопротивление, соотношения высоты и ширины пористого ребра на тепловую картину. Полученное аналитическое решение качественно и количественно согласуется с экспериментальными данными, полученными другими авторами. Предложенный инструментарий может быть использован для разработки современных конструкций компактных пористых теплообменников для различных предметных областей

**Ключевые слова:** интенсификация, пористый теплообменник, однофазный конвективный теплоперенос

### Введение

Современные технические системы характеризуются конструктивной компактностью, например, миниатюрные радиоэлектронные приборы и устройства, малогабаритные генераторы тепловой энергии, мобильные энергоустановки, наземные системы управления космическими комплексами и т.д. При этом возникает проблема охлаждения интенсивно выделяющих поверхностей, а классические методы при этом оказываются малоэффективными. Одним из наиболее эффективных методов интенсификации процессов теплообмена в различного рода энергетических устройствах и системах является пористое охлаждение [1 - 2]. В связи с этим необходимо решать вопрос разработки методики расчета систем пористого охлаждения. Анализ современных исследований показал, что зачастую аналитически решаются задачи в одномерной и двумерной постановке, т.е. в приближении плоской геометрии [3]. На самом деле реальные конструкции теплообменников имеют объемную геометрическую форму, что требует решения задачи в трехмерной постановке [4]. Подобная задача была ранее решена в приближении однотемпературной модели [5, 6], однако экспериментальные исследования показывают, что неучет разности температур между пористым карка-

сом и охладителем приводит к некорректному решению в условиях интенсивного тепловыделения [7]. Кроме того, актуальным является вопрос учета гидродинамической структуры потока во входном участке пористого канала. Это связано с тем, что на начальном участке теплообмен существенно интенсифицирован, что также является актуальным для компактных систем пористого охлаждения энергонасыщенных систем. Если при малых пористостях профиль скорости теплоносителя устанавливается практически мгновенно во входной области пористого канала [8], то появление высокопористых ячеистых материалов [9] дополнительно требует оценки возможного влияния гидродинамического начального участка на теплоотдачу в пористом канале.

В связи с развитием компьютерной техники и появлением ряда мощных вычислительных пакетов типа ANSYS, COMSOL и пр. стало возможным непосредственно моделировать явления переноса в микроканальных средах, однако при практическом программировании конкретных постановок необходимо знание большого набора неизвестных эмпирических коэффициентов, что ограничивает их применение и снижает ценность получаемой информации.

При использовании вычислительных пакетов практически невозможно быстро разработать рациональную конструкцию компактного теплообменника. Это связано с тем, что вычислительный пакет позволяет лишь осуществить расчет заданной пользователем конструкции. В случае необходимости построения конструкции с заданными гидравлическими и тепловыми характеристиками пользователь вынужден многократно проводить расчеты для различных геометрических параметров, пока не будет найдено оптимальное соотношение, удовлетворяющее исходным данным, что ведет к существенному росту трудозатрат на разработку компактных систем охлаждения.

В связи с вышеизложенным в данной работе аналитически анализируются гидродинамика и теплообмен в прямоугольном пористом канале при ламинарном течении охладителя с учетом двухтемпературной модели теплообмена в широком диапазоне изменения основных параметров.

### Постановка задачи

Физическую модель пористой среды будем представлять, как и в [10], в виде плотной недеформируемой упаковки сфер, пустоты которой соединены между собой и заполнены жидкостью. Течение охладителя ламинарное однофазное за счет вынужденной конвекции.

Гидродинамика течения охладителя описывается моделью Дарси-Бринкмана-Форчхеймера в модификации Ксу-Ченга [11]:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \bar{V} &= 0; \quad (1) \\ \frac{\rho_f}{\varepsilon} \left[ \frac{\partial \bar{V}}{\partial \tau} + \frac{(\bar{V} \cdot \nabla) \bar{V}}{\varepsilon} \right] &= \rho_f \bar{g} - \nabla p + \\ &+ \mu_f \nabla^2 \bar{V} - \left[ \mu_f \frac{\bar{V}}{K} + \rho_f \frac{b|\bar{V}|}{\sqrt{K}} \right]; \quad (2) \end{aligned}$$

где  $\tau$  - время;  $\rho_f, \mu_f$  - плотность и динамическая вязкость жидкости;  $\varepsilon$  - пористость;  $\bar{V}$  - вектор скорости жидкости;  $\bar{g}$  - вектор ускорения свободного падения;  $p$  - давление. Проницаемость пористого каркаса определим из [12]

$$K = \varepsilon^2 d_p^2 / [150 - (1 - \varepsilon)];$$

фактор трения Форчхеймера равен

$$b \approx 0,00117 d_p / (1 - \varepsilon),$$

где  $d_p$  - среднечисленный диаметр сферических частиц в пористом слое.

Температуры определяются по уравнениям двухтемпературной модели Шуммана [13]:

для жидкости

$$\begin{aligned} \varepsilon (\rho C_p)_f \frac{\partial t_f}{\partial \tau} + \varepsilon (\rho C_p)_f \bar{V} \nabla t_f &= ; \quad (3) \\ = \nabla \cdot (\lambda_e^f \cdot \nabla t_f) \pm \alpha_{sf} a_{sf} (t_s - t_f) \end{aligned}$$

для пористого каркаса

$$\begin{aligned} (1 - \varepsilon) (\rho C_p)_s \frac{\partial t_s}{\partial \tau} &= \\ = \nabla \cdot (\lambda_e^s \cdot \nabla t_s) \mp \alpha_{sf} a_{sf} (t_s - t_f), \quad (4) \end{aligned}$$

где  $\lambda_e^f, \lambda_e^s$  - тензоры эффективных коэффициентов теплопроводности жидкости и материала скелета пористого тела;  $t_f, t_s$  - температуры жидкости и скелета пористого тела;  $\alpha_{sf}$  - коэффициент теплоотдачи между жидкой фазой и скелетом пористого тела;  $a_{sf}$  - характерная площадь смоченной поверхности в пористом теле;  $\rho_s, c_{ps}$  - плотность и массовая теплоемкость скелета пористого тела;  $c_{pf}$  - массовая теплоемкость жидкости.

Предполагаем, что теплофизические параметры в (1) – (4) однородны и не зависят от температуры. В этом случае [14]:

$$a_{sf} = 6(1 - \varepsilon) / d_p;$$

$$\alpha_{sf} = \lambda_f \left[ 2 + 1,1 \text{Pr}^{0,5} \left( \rho_f |\bar{V}| d_p / \mu_f \right)^{0,6} \right] / d_p;$$

$$\lambda_e^f = \left[ \varepsilon + (0,1 \div 0,5) \text{Pr}^0 \left( \frac{\rho_f |\bar{V}| d_p}{\mu_f} \right) \right] \lambda_f;$$

$$\lambda_e^s = (1 - \varepsilon) \lambda_s,$$

где  $\text{Pr}^0 = \mu_f c_{pf} / \lambda_f$ ;  $\lambda_f, c_{pf}$  - теплопроводность и теплоемкость жидкости  $\lambda_s$  - теплопроводность пористого тела.

Постановку граничных условий осуществим в рамках классического анализа задач тепломассопереноса для гомогенных сред [15].

Расчетная схема 3D-теплообменника представлена на рис. 1.

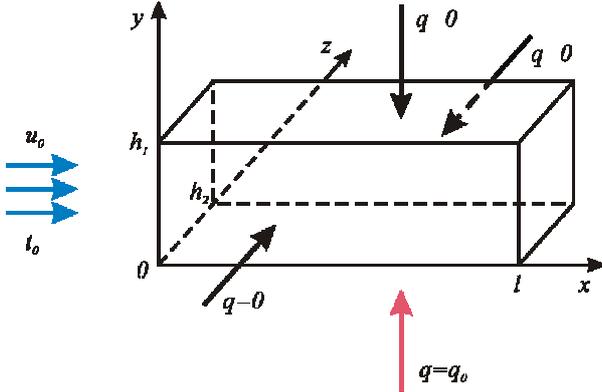


Рис. 1. Расчетная 3D-модель теплообменника

На вход пористого теплообменника длиной  $l$  с постоянным поперечным сечением высотой  $h_1$  и шириной  $h_2$  подается ламинарный поток охладителя, имеющего температуру  $t_0$  со скоростью  $u_0$ . Корпус теплообменника непроницаем для теплоносителя, боковые и верхняя поверхности теплоизолированы, а на нижней задан тепловой поток  $q_0$ .

С учетом трехмерной расчетной схемы уравнения (1) – (4) запишем в виде:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial Y} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0 ; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial \Theta} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} + W \frac{\partial U}{\partial Z} = \\ = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right) - ; \quad (6) \\ - \left( \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Da}} + \frac{B}{\sqrt{\text{Da}}} \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} \right) U \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial \Theta} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} + W \frac{\partial V}{\partial Z} = \\ = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} \right) - ; \quad (7) \\ - \left( \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Da}} + \frac{B}{\sqrt{\text{Da}}} \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} \right) V \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial \Theta} + U \frac{\partial W}{\partial X} + V \frac{\partial W}{\partial Y} + W \frac{\partial W}{\partial Z} = \\ = -\frac{\partial P}{\partial Z} + \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Z^2} \right) - ; \quad (8) \\ - \left( \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Da}} + \frac{B}{\sqrt{\text{Da}}} \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} \right) W \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial T_f}{\partial \Theta} + U \frac{\partial T_f}{\partial X} + V \frac{\partial T_f}{\partial Y} + W \frac{\partial T_f}{\partial Z} = \\ = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \left( \frac{\partial^2 T_f}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial Z^2} \right) + ; \quad (9) \\ + \frac{\text{Nu}_p \cdot \text{Re}}{\text{Pr} \cdot \text{Re}_p^2} (\Lambda T_s - T_f) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (1 - \varepsilon) \text{Lu} \cdot \text{Pr} \cdot \text{Re} \frac{\partial T_s}{\partial \Theta} = \frac{\partial^2 T_s}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial Z^2} - \\ - \text{Nu}_p \left( \frac{\text{Re}}{\text{Re}_p} \right)^2 (\Lambda T_s - T_f) \end{aligned} \quad ; \quad (10)$$

где  $\Theta = u_0 \tau / \varepsilon d_h$  ;  $X = x/d_h$  ;  $Y = y/d_h$  ;  $Z = z/d_h$  ;  $U = u/u_0$  ;  $V = v/v_0$  ;  $W = \omega/\omega_0$  ;  $u, v, \omega$  - компоненты вектора скорости жидкости;

$$d_h = 2h_1 h_2 / (h_1 + h_2) ;$$

$$T_f = \lambda_e^f (t_f - t_0) / (q_0 h) ; \quad T_s = \lambda_s^s (t_s - t_0) / (q_0 h) ;$$

$$P = \varepsilon^2 p / \rho_f u_0^2 ; \quad B = \varepsilon^2 b - \text{безразмерный}$$

параметр Форчхеймера :  $\text{Re} = \rho_f u_0 d_h / \mu_f \varepsilon^2$  -

число Рейнольдса :  $\text{Re}_p = \rho_f u_0 d_p / [6(1 - \varepsilon) \mu_f]$

- локальное число Рейнольдса;

$\text{Pr} = \varepsilon (\rho C_p)_f \mu_f / (\lambda_e^f \rho_f)$  - число Прандтля;

$\text{Nu}_p = \alpha_{sf} d_p / \lambda_e^f$  - локальное число Нуссельта;

$\text{Lu} = [\lambda_e^f / (\rho c_p)_f] / [\lambda_e^s / (\rho c_p)_s]$  - число

Лыкова;  $\text{Da} = K/d_h^2$  - число Дарси;  $\Lambda = \lambda_e^f / \lambda_e^s$ .

Система (5) – (10) имеет линейный характер, поэтому возможно аналитическое решение сначала гидродинамической задачи, а затем тепловой.

В качестве допущения примем гипотезу об однонаправленности течения охладителя в пористом теплообменнике, т.е. ( $V = W \equiv 0$ ), малой величине инерционных эффектов при падении давления [16]. С учетом погранслойной линеаризации [17], принимая во внимание  $\Theta = X/\varepsilon$ , система (5) – (8) запишется в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial X} = -\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{\varepsilon \text{Re}} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right) - \\ - \frac{U}{\varepsilon \cdot \text{Re} \cdot \text{Da}} \end{aligned} \quad ; \quad (11)$$

Граничные условия запишутся в виде

$$U(0, X, Z) = 1 ; \quad (12)$$

$$U(X, 0, Z) = U(X, Y, 0) = U(X, H_1, Z) = U(X, Y, H_2) = 0, \quad (13)$$

где  $H_1 = (1 + \eta)/2$ ;  $H_2 = (1 + \eta^{-1})/2$ ;  $\eta = h_1/h_2$ ; в которой  $dP/dX$  определяется из условия сохранения расхода жидкости через поперечное сечение пористого теплообменника

$$\frac{1}{H_1 \cdot H_2} \int_0^{H_1} \int_0^{H_2} U(\infty, Y, Z) dY dZ = 1. \quad (14)$$

Для тепловой системы (9) – (10) введем допущение о стационарности полагая, что  $\partial^2 T_{f,s} / \partial X^2 \ll (\partial^2 T_{f,s} / \partial Y^2 \text{ и } \partial^2 T_{f,s} / \partial Z^2)$  при выполнении условия  $d_h \ll l$  [18].

$$U \frac{\partial T_f}{\partial X} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \left( \frac{\partial^2 T_f}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial Z^2} \right) + \frac{Nu_p \cdot \text{Re}}{\text{Pr} \cdot \text{Re}_p^2} (\Delta T_s - T_f) \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 T_s}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial Z^2} - Nu_p \left( \frac{\text{Re}}{\text{Re}_p} \right)^2 (\Delta T_s - T_f) = 0. \quad (16)$$

Граничные условия запишутся как

$$T_f(0, y, z) = 0; \quad (17)$$

$$\frac{\partial T_{f,s}(X, 0, Z)}{\partial Y} = -1; \quad (18)$$

$$\frac{\partial T_{f,s}(X, H_1, Z)}{\partial Y} = \frac{\partial T_{f,s}(X, Y, 0)}{\partial Z} = \frac{\partial T_{f,s}(X, Y, H_2)}{\partial Z} = 0 \quad (19)$$

### Решение задачи

Точное аналитическое решение гидродинамической и тепловой задач получено в [19 – 20].

Решение осуществлялось путем интегрального преобразования Лапласа с последующим обратным преобразованием Фурье.

В результате для гидродинамической задачи получено

$$U(X, Y, Z) = \frac{4}{H_1 H_2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} (\lambda_m \mu_n)^{-1} [1 - (-1)^m] [1 - (-1)^n] \cdot \left[ \left( 1 + \frac{C}{a_{mn}} \right) \exp(a_{mn} X) - \frac{C}{a_{mn}} \right] \sin(\lambda_m Y) \sin(\mu_n Z), \quad (20)$$

где  $\lambda_m = m\pi/H_1$ ;  $\mu_n = n\pi/H_2$ ;  $a_{mn} = -(\lambda_m^2 + \mu_n^2 + Da^{-1}) / (\varepsilon \text{Re})$ ;

$$C = -\varepsilon^{-1} dP/dX.$$

Параметр C найден из условия (14)

$$C = \left\{ -\frac{4}{H_1 H_2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} (\lambda_m \mu_n)^{-2} [1 - (-1)^m]^2 \times [1 - (-1)^n]^2 / a_{mn} \right\}^{-1}, \quad (21)$$

по которому определён коэффициент гидравлического сопротивления по Фаннингу [21]

$$\xi = -\frac{2}{\varepsilon} C. \quad (22)$$

Длина гидравлического начального участка вычислена для квазирегулярного режима [17] ( $m=n=1$ ) по соотношению

$$1 - \frac{U(X, H_1/2, H_2/2)}{U(\infty, H_1/2, H_2/2)} = \gamma.$$

Относительные отклонения  $\gamma$  обычно принимают равными 0,02, откуда

$$X = -\frac{\varepsilon \text{Re}}{\left( \frac{\pi}{H_1} \right)^2 + \left( \frac{\pi}{H_2} \right)^2 + \frac{1}{Da}} \times \ln \left\{ \frac{\gamma C}{-\left[ \left( \frac{\pi}{H_1} \right)^2 + \left( \frac{\pi}{H_2} \right)^2 + \frac{1}{Da} \right] (\varepsilon \text{Re})^{-1} + C} \right\}. \quad (23)$$

В практически важных случаях  $Da \ll 10^{-5}$ , поэтому система (15) – (19) существенно упрощается из-за того, что  $U \approx 1$ . В результате получим:

$$T_f(X, Y, Z) = \frac{1}{H_1 H_2} \left\{ \frac{2\Omega_0}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} X + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{b_m}{a_m} [\exp(a_m X) - 1] \cos(p_m Y) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n}{a_n} [\exp(a_n X) - 1] \cos(q_n Z) + 4 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_{mn}}{a_{mn}} [\exp(a_{mn} X) - 1] \cos(q_n Z) \cos(p_m Y) \right\}, \quad (24)$$

где  $p_m = m\pi/H_1$ ;  $m = \overline{1, \infty}$ ;  $q_n = n\pi/H_2$ ;  $n = \overline{1, \infty}$ ;

$$a_m = \frac{Nu_p \left( \frac{Re}{Re_p} \right)^2 \frac{Nu_p Re}{Re_p^2 \cdot Pr} \Lambda}{p_m^2 + Nu_p \left( \frac{Re}{Re_p} \right)^2 \Lambda} - \left( \frac{p_m^2}{Re \cdot Pr} + \frac{Nu_p Re}{Re_p^2 \cdot Pr} \right);$$

$$b_m = \frac{\frac{\Omega_0}{Re \cdot Pr} \left[ p_m^2 + Nu_p \left( \frac{Re}{Re_p} \right)^2 \Lambda \right] + \Omega_0 \frac{Nu_p Re}{Re_p^2 \cdot Pr} \Lambda}{p_m^2 + Nu_p \left( \frac{Re}{Re_p} \right)^2 \Lambda};$$

$$a_n = \frac{Nu_p \left( \frac{Re}{Re_p} \right)^2 \frac{Nu_p Re}{Re_p^2 \cdot Pr} \Lambda}{q_n^2 + Nu_p \left( \frac{Re}{Re_p} \right)^2 \Lambda} - \left( \frac{q_n^2}{Re \cdot Pr} + \frac{Nu_p Re}{Re_p^2 \cdot Pr} \right);$$

$$b_n = \frac{\frac{\Omega_n}{Re \cdot Pr} \left[ q_n^2 + Nu_p \left( \frac{Re}{Re_p} \right)^2 \Lambda \right] + \Omega_n \frac{Nu_p Re}{Re_p^2 \cdot Pr} \Lambda}{q_n^2 + Nu_p \left( \frac{Re}{Re_p} \right)^2 \Lambda};$$

$$a_{mn} = \frac{Nu_p \left( \frac{Re}{Re_p} \right)^2 \frac{Nu_p Re}{Re_p^2 \cdot Pr} \Lambda}{p_m^2 + q_n^2 + Nu_p \left( \frac{Re}{Re_p} \right)^2 \Lambda} -$$

$$\left( \frac{p_m^2}{Re \cdot Pr} + \frac{q_n^2}{Re \cdot Pr} + \frac{Nu_p Re}{Re_p^2 \cdot Pr} \right)$$

$$b_{mn} = \frac{\frac{\Omega_n}{Re \cdot Pr} \left[ p_m^2 + q_n^2 + Nu_p \left( \frac{Re}{Re_p} \right)^2 \Lambda \right] + \Omega_n \frac{Nu_p Re}{Re_p^2 \cdot Pr} \Lambda}{p_m^2 + q_n^2 + Nu_p \left( \frac{Re}{Re_p} \right)^2 \Lambda}$$

$$\Omega_n = \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \left[ 1 - (-1)^k \right] \times$$

$$\times \left\langle \frac{H_2}{2\pi(k-n)} \left\{ 1 - \cos[\pi(k-n)] \right\} + \right.$$

$$\left. + \frac{H_2}{2\pi(k+n)} \left\{ 1 - \cos[\pi(k+n)] \right\} \right\rangle,$$

при  $n \neq k$ ; при  $k = n \Rightarrow \Omega \equiv 0$ .

$$T_s(X, Y, Z) = \frac{1}{H_1 H_2} \left\{ \frac{\Omega_0}{Nu_p \left( \frac{Re}{Re_p} \right)^2 \Lambda} + \frac{2\Omega_0 X}{Re \cdot Pr \cdot \Lambda} + \right.$$

$$+ 2 \sum_{m=1}^{\infty} f_m \left[ \left( 1 - \frac{c_m}{d_m} \right) \exp(-d_m X) + \frac{c_m}{d_m} \right] \cos(p_m Y) +$$

$$+ 2 \sum_{n=1}^{\infty} f_n \left[ \left( 1 - \frac{c_n}{d_n} \right) \exp(-d_n X) + \frac{c_n}{d_n} \right] \cos(q_n Z) +$$

$$+ 4 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} f_{mn} \left[ \left( 1 - \frac{c_{mn}}{d_{mn}} \right) \exp(-d_{mn} X) + \frac{c_{mn}}{d_{mn}} \right] \times$$

$$\left. \times \cos(q_n Z) \cos(p_m Y) \right\}, \quad (25)$$

где

$$c_m = \frac{p_m^2}{Re \cdot Pr} + \frac{Nu_p Re}{Re_p^2 \cdot Pr} + \frac{Nu_p}{Re \cdot Pr} \left( \frac{Re}{Re_p} \right)^2;$$

$$d_m = \frac{p_m^2}{Re \cdot Pr} + \frac{Nu_p Re}{Re_p^2 \cdot Pr} -$$

$$- Nu_p \left( \frac{Re}{Re_p} \right)^2 \frac{Nu_p Re}{Re_p^2 \cdot Pr} \Lambda \left/ \left[ p_m^2 + Nu_p \left( \frac{Re}{Re_p} \right)^2 \Lambda \right]; \right.$$

$$f_m = \Omega_0 \left/ \left[ p_m^2 + Nu_p \left( \frac{Re}{Re_p} \right)^2 \Lambda \right]. \right.$$

$$c_n = \frac{q_n^2}{Re \cdot Pr} + \frac{Nu_p Re}{Re_p^2 \cdot Pr} + \frac{Nu_p}{Re \cdot Pr} \left( \frac{Re}{Re_p} \right)^2;$$

$$d_n = \frac{q_n^2}{Re \cdot Pr} + \frac{Nu_p Re}{Re_p^2 \cdot Pr} -$$

$$- Nu_p \left( \frac{Re}{Re_p} \right)^2 \frac{Nu_p Re}{Re_p^2 \cdot Pr} \Lambda \left/ \left[ q_n^2 + Nu_p \left( \frac{Re}{Re_p} \right)^2 \Lambda \right]; \right.$$

$$f_n = \Omega_n \left/ \left[ q_n^2 + Nu_p \left( \frac{Re}{Re_p} \right)^2 \Lambda \right]. \right.$$

$$c_{mn} = \frac{p_m^2}{Re \cdot Pr} + \frac{q_n^2}{Re \cdot Pr} + \frac{Nu_p Re}{Re_p^2 \cdot Pr} + \frac{Nu_p}{Re \cdot Pr} \left( \frac{Re}{Re_p} \right)^2;$$

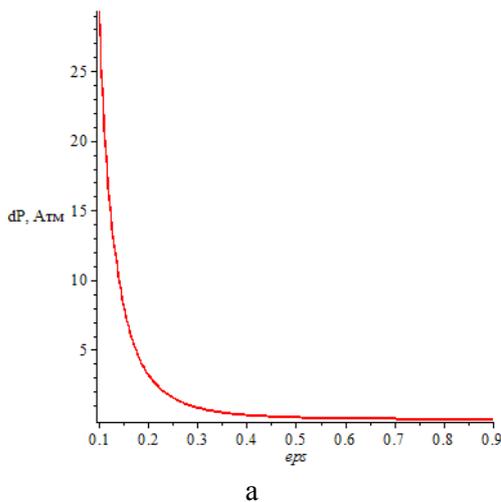
$$d_{mn} = \frac{p_m^2}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} + \frac{q_n^2}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} + \frac{Nu_p \text{Re}}{\text{Re}_p^2 \cdot \text{Pr}} -$$

$$- Nu_p \left( \frac{\text{Re}}{\text{Re}_p} \right)^2 \frac{Nu_p \text{Re}}{\text{Re}_p^2 \cdot \text{Pr}} \Lambda \left/ \left[ p_m^2 + q_n^2 + Nu_p \left( \frac{\text{Re}}{\text{Re}_p} \right)^2 \Lambda \right] \right.$$

$$f_{mn} = \Omega_n \left/ \left[ p_m^2 + q_n^2 + Nu_p \left( \frac{\text{Re}}{\text{Re}_p} \right)^2 \Lambda \right] \right.$$

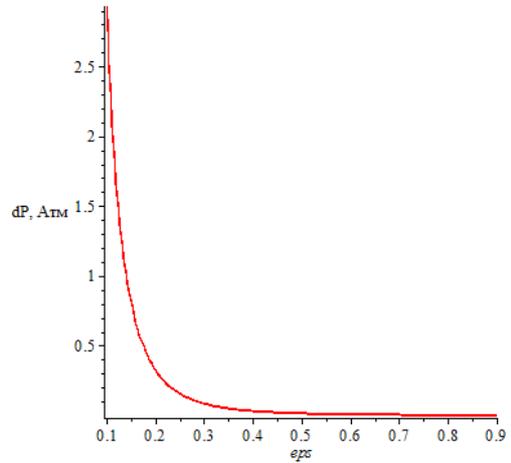
**Анализ полученных результатов**

Проведем анализ полученного аналитического решения при анализе гидротермических характеристик компактного пористого теплообменника, в котором в качестве охладителя используется жидкость, близкая по своим теплофизическим свойствам к воде. Гидравлические размеры поперечного сечения теплообменника: высота  $h_1 = 0,01$  м; ширина  $h_2 = 0,02$  м; длина теплообменника  $l = 0,02$  м. Среднечисленный диаметр частиц в пористом слое  $d_p = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м; пористость  $\varepsilon = 0,4$ . Теплофизические параметры:  $\mu_f = 0,5 \cdot 10^{-4}$  Па·с;  $\rho_f = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda_f = 0,68$  Вт/(м·К);  $C_{pf} = 4190$  Дж/(кг·К);  $\lambda_s = 385$  Вт/(м·К). Температура охладителя на входе в теплообменник 20°C. Удельный тепловой поток с охлаждаемой поверхности  $q_0 = 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>. Массовый расход охладителя  $G = 10^{-3} \div 0,1$  кг/с.

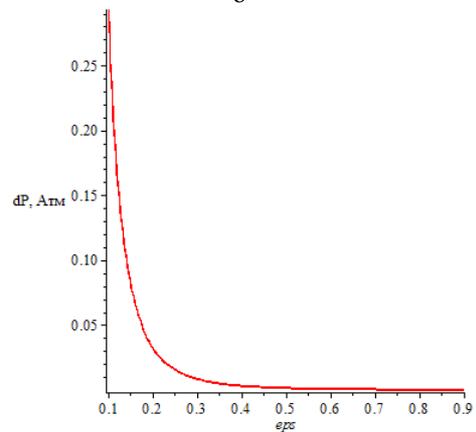


а

Рис. 2. Потери давления в пористом теплообменнике при  $d_p = 5 \cdot 10^{-3}$  м;  $h_1 = 0,01$  м;  $h_2 = 0,02$  м и различных значениях массового расхода охладителя  $G$ , кг/с: а – 0,1; б – 0,01; в – 0,0001



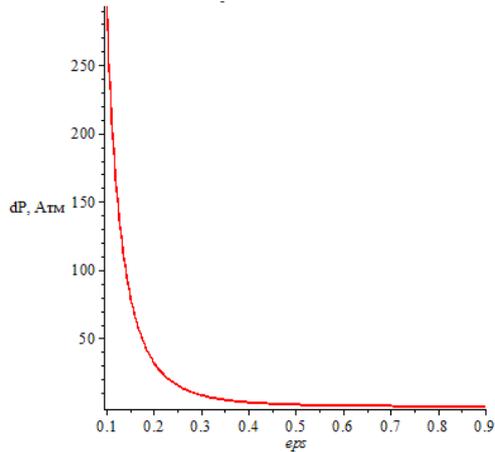
б



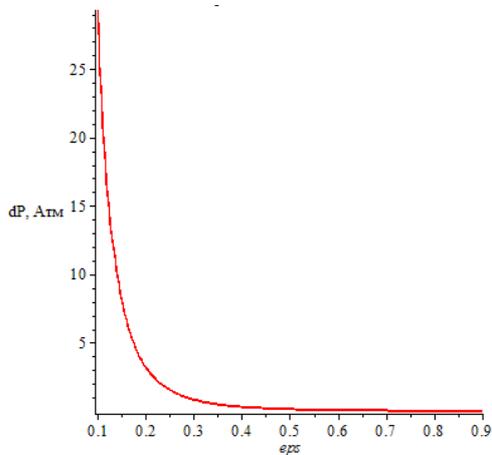
в

Рис. 2. Потери давления в пористом теплообменнике при  $d_p = 5 \cdot 10^{-3}$  м;  $h_1 = 0,01$  м;  $h_2 = 0,02$  м и различных значениях массового расхода охладителя  $G$ , кг/с: а – 0,1; б – 0,01; в – 0,0001 (продолжение)

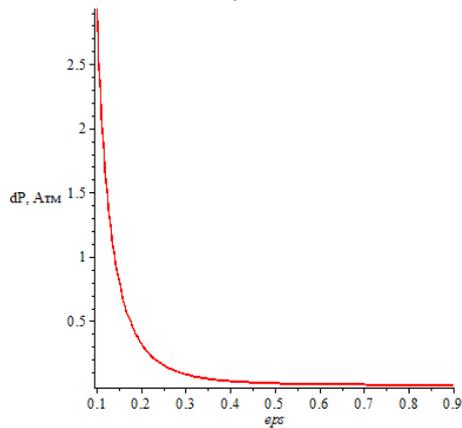
Гидравлическая характеристика такого теплообменника (рис.2) во всем диапазоне изменения расхода оказывается приемлемой при соответствующем выборе перекачивающего насоса. Если уменьшить характерный среднечисленный диаметр сферических частиц в пористом элементе на порядок (рис. 3), то картина резко меняется в сторону увеличения потерь давления.



а



б



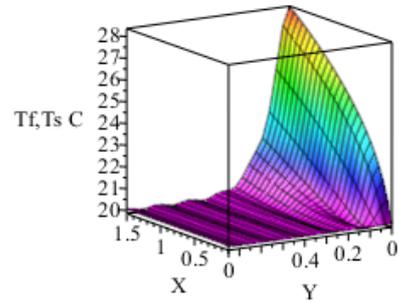
в

Рис. 3. Потери давления в пористом теплообменнике при  $d_p = 5 \cdot 10^{-4}$  м;  $h_1 = 0,01$  м;  $h_2 = 0,02$  м и различных значениях массового расхода охладителя  $G$ , кг/с: а – 0,1; б – 0,01; в – 0,0001

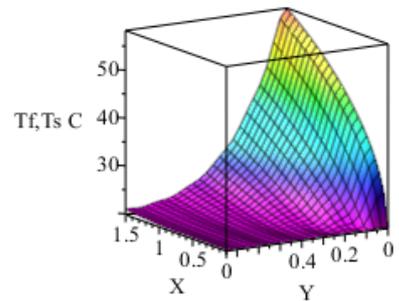
Поэтому выбор геометрии пористого слоя определяется анализом требуемых тепловых характеристик.

Поля температур (рис. 4 и 5) свидетельствуют о том, что увеличение поровой скорости за счет уменьшения  $d_p$  не приводит к интенсификации теплосъема с охлаждаемой поверхности.

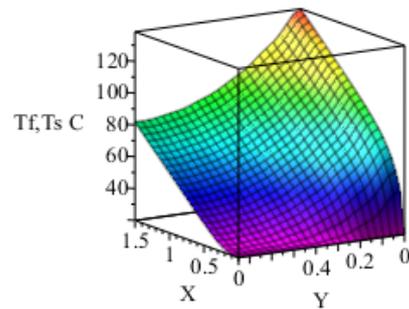
фикации теплосъема с охлаждаемой поверхности.



а



б



в

Рис. 4. Поля температур в сечении  $z=0,5$  при  $h_1 = 0,01$  м;  $h_2 = 0,02$  м;  $\varepsilon = 0,4$ ;  $d_p = 5 \cdot 10^{-3}$ ; и различных значениях массового расхода теплоносителя  $G$ , кг/с: а – 0,1; б – 0,01; в – 0,001

Если увеличить высоту теплообменника до  $h_1 = 0,02$  м с эквидистантным увеличением расхода, то выигрыш температуры охлаждаемой поверхности составляет до  $5^\circ\text{C}$  (рис. 6), что подтверждает наличие эффекта «пористого ребра». Если же наоборот, уменьшить высоту теплообменника до  $h_1 = 0,005$  м с сохранением гидродинамических показателей по расходу теплоносителя, то это изменяет эффективность теплообменника в худшую сторону (рис. 7).

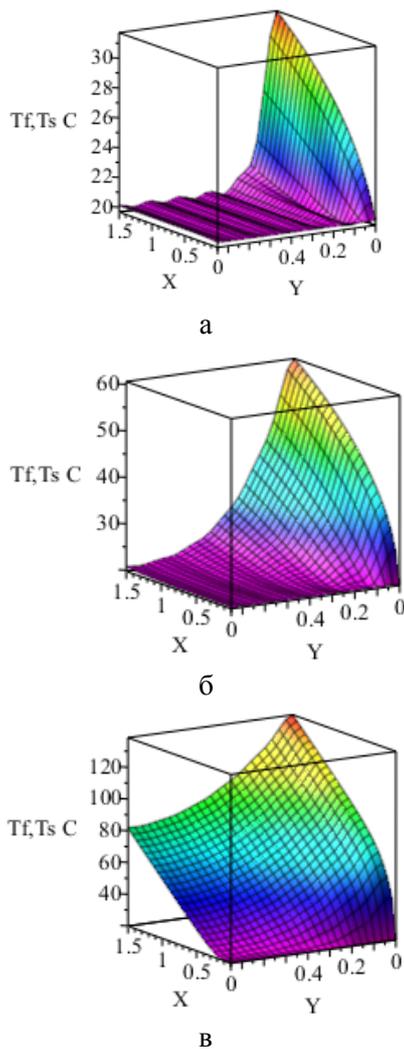


Рис. 5. Поля температур в сечении  $z=0,5$  при  $h_1 = 0,01$  м;  $h_2 = 0,02$  м;  $\varepsilon = 0,4$ ;  $d_p = 5 \cdot 10^{-4}$ ; и различных значениях массового расхода теплоносителя  $G$ , кг/с: а – 0,1; б – 0,01; в – 0,001

Отметим также, что среднеинтегральные характеристики температурных полей, существенно сглаживают их неоднородность, а это в свою очередь может привести к нетипичной интерпретации гидродинамической обстановке. Например, при небольших расходах могут наблюдаться условия закипания и интенсивного испарения теплоносителя, что создаст ситуацию с возможным переходом в газодинамический режим течения с последующими изменениями гидродинамической обстановки в теплообменнике.

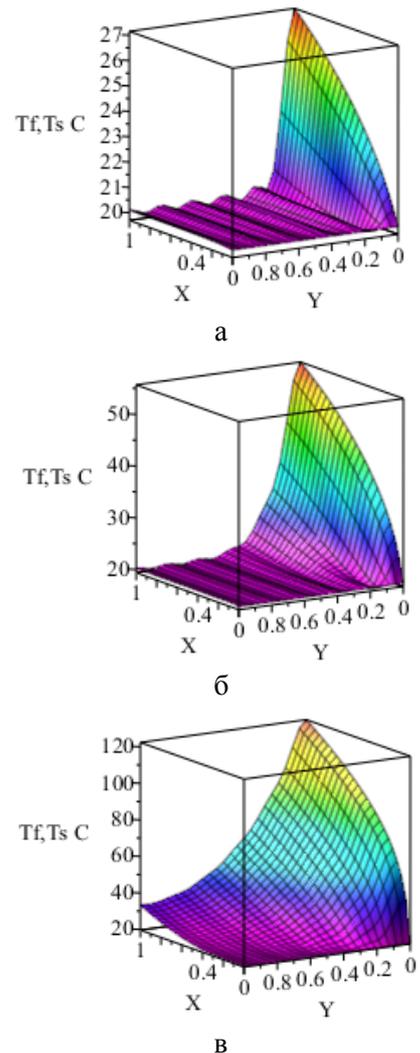


Рис. 6. Поля температур в сечении  $z=0,5$  при  $h_1 = 0,02$  м;  $h_2 = 0,02$  м;  $\varepsilon = 0,4$ ;  $d_p = 5 \cdot 10^{-3}$  м; и различных значениях массового расхода теплоносителя  $G$ , кг/с: а – 0,2; б – 0,02; в – 0,002

Установлено, что данные аналитического расчета теплопереноса в пористых средах теплообменников хорошо коррелируют с известными экспериментальными данными, что подтверждает возможность использования разработанных математических моделей для разработок теплообменников различного типа.

Для подтверждения достоверности разработанной математической модели было проведено сопоставление результатов настоящей работы для пористых шарообразных засыпок с данными работы [22] в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re=100 - 500$  (рис. 8).

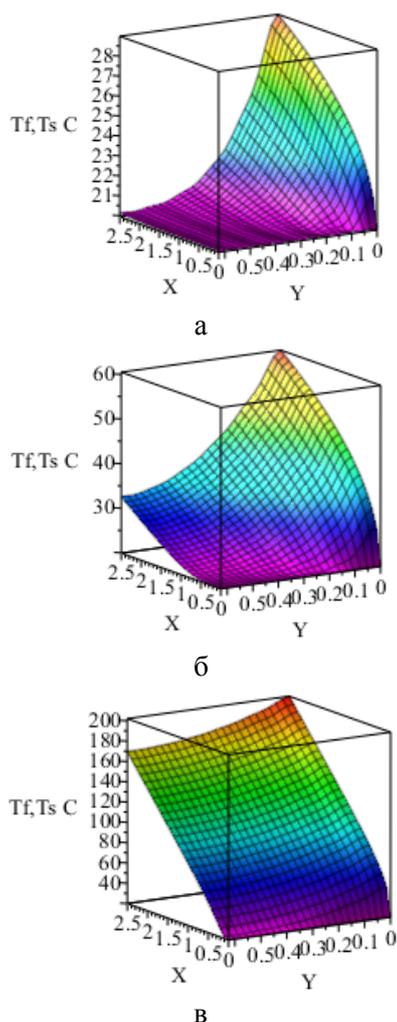


Рис. 7. Поля температур в сечении  $z=0,5$  при  $h_1 = 0,005$  м;  $h_2 = 0,02$  м;  $\varepsilon = 0,4$ ;  $d_p = 5 \cdot 10^{-3}$ ; и различных значениях массового расхода теплоносителя  $G$ , кг/с: а – 0,05; б – 0,005; в – 0,0005

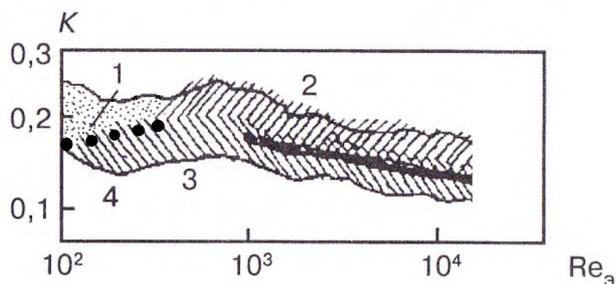


Рис. 8. Зависимость числа  $K$  от числа Рейнольдса: 1 – шахматные пучки труб; 2 – перекрестные пучки труб, 3 – витые трубы, 4 – шаровые засыпки, • - расчет для пористых сред

### Выводы

Представленная математическая модель позволяет получать широкий спектр различных теплогидравлических характеристик пористых теплообменников и может рассматриваться как

универсальный инструментальный при разработке нового или выборе рациональных режимов функционирования существующего теплообменного оборудования.

### Литература

1. Delavar M.A., Azimi M. I. Using porous for heat transfer enhancement in heat exchangers: review // J. of Eng. Science and Technology Review. 2013. V. 6. № 1. Pp. 14-16.
2. Bayomy A.M., Saghir M. Z. Heat transfer characteristics of aluminum metal foam subjected to a pulsating / steady water flow: Experimental and numerical approach // Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2016. V. 97. Pp. 318-336.
3. Vafai K. Handbook of porous media. – NY: CRC Press Taylor & Francis Group, 2005. 742 p.
4. Hung T.C., Hung Y.S., Yan W.M. Design of Porous-Microchannel Heat Sinks with Different Porous Configurations // Int. J. of Materials, Mechanics and Manufacturing. 2016. V. 4. № 2. Pp. 89-94.
5. Hooman K., Merrikh A.A. Analytical Solution of Forced Convection in a Duct of Rectangular Cross Section Saturated by a Porous Medium // J. of Heat Transfer. 2006. V. 128. № 6. Pp. 596-600.
6. Hooman K., Gurgenci H., Merrikh A.A. Heat transfer and entropy generation optimization of forced convection in porous-saturated ducts of rectangular cross-section // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2007. V. 50. № 10. Pp. 2051-2059.
7. Kurtbas I., Celik N. Experimental investigation of forced and mixed convection heat transfer in a foam – filled horizontal rectangular channel // Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2009. V. 52. № 9. Pp. 1313 – 1325.
8. Nield D.A., Bejan A. Convection in Porous Media. NY: Springer, 2006. 654 p.
9. Lu W., Zhao C.Y., Tassen S.A. Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers // Int. J. Heat Mass Transfer. 2006. V. 49. № 11. Pp. 2751 – 2770.
10. Bear J., Bachmat Y. Introduction to modeling of transport phenomena in porous media. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1991. 553 p.
11. Hsu C.T., Cheng P. Thermal dispersion in a porous medium // Int. J. Heat Mass Transfer. 1990. V. 33. № 8. Pp. 1587-1597.
12. Beji H., Gobin D. Influence of thermal dispersion on natural-convection heat-transfer in porous-media // Numer. Heat Transfer, Part A. 1992. V. 22. Pp. 487-500.
13. Gamal A.A., Furmanski P. Problems of modeling flow and heat transfer in porous media // Biuletyn Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej. 1997. № 85. Pp. 55-88.
14. Amiri A., Vafai K. Analysis of dispersion effects and non thermal equilibrium, non-Darsian variable porosity incompressible flow through porous media // Int. J. Heat and Mass Transfer. 1994. V. 37. № 6. Pp. 939 – 954.
15. Попов И.А. Гидродинамика и теплообмен в пористых теплообменных элементах и аппаратах. Казань: Центр информационных технологий, 2007. 240 с.
16. Izadpanah M.R., Muller-Steinhagen H., Jamialahmadi M. Experimental and theoretical studies of convective heat transfer in a cylindrical porous medium // Int. J. of Heat and Fluid Flow. 1998. V. 19. Pp. 629-635.
17. Слезкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1955. 579 с.

18. Emerging Technologies and Techniques in Porous Media, NATO Advanced Study Institute, Series 2:Mathematic, Physics and Chemistry / Springer Science + Business Media, B.V. 2004. Vol. 134. 512 p.

19. Analytical solution to the problem of convective heat transfer in a porous rectangular channel for thermal boundary conditions of the second genus / D.A. Kononov, V.I. Ryazhskikh, A.V. Ryazhskikh, A.A. Boger, S.V. Dakhin // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software (Bulletin SUSU MMCS), 2017, vol. 10, no. 3, pp. 40-53.

20. Kononov D.A., Ryazhskikh V.I., Drozdov I.G. Analytical solution of hydrodynamics and heat exchange prob-

lem in a porous rectangular channel for thermal boundary conditions of the second kind // РТПЕ-2017. ИОП Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 891 (2017) 012103.

21. Берд Р., Стьюат В., Лайтфут Е. Явления переноса. М.: Химия, 1975. 688 с.

22. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах: монография / Б.В. Дзюбенко, Ю.А. Кузма-Кичта, А.И. Леонтьев, И.И. Федик, Л.П. Холпанов. М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2008. 532 с.

Поступила 14.02.2018; принята к публикации 29.03.2018

#### Информация об авторах

**Ряжских Виктор Иванович** – д-р физ.-мат. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: ryazhskih\_vi@mail.ru

**Коновалов Дмитрий Альбертович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: dmikononov@yandex.ru

**Трошин Алексей Юрьевич** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: troshinay@mail.ru

## EVALUATION OF THE HYDROTHERMAL CHARACTERISTICS OF POROUS COMPACT HEAT EXCHANGER

V.I. Ryazhskikh, D.A. Kononov, A.Y. Troshin

Voronezh State Technical University

**Abstract:** the work is devoted to the determination of hydrothermal characteristics in the forced single-phase flow of a coolant through a porous compact heat exchange element in a 3D-setting. A new mathematical model based on the Darcy-Brinkman-Forchheimer hydrodynamic model in the Xu-Cheng modification and the thermal model based on the Shumman model was synthesized. The linearization of the equations of the mathematical model made it possible to consistently obtain the exact analytical solution first of the hydrodynamic problem, and then the thermal one. On the basis of the exact analytical solution of the hydrodynamic and thermal problems obtained, the hydrodynamic resistance coefficient of the channel filled with a porous medium, the length of the hydrodynamic initial section, the temperature of the porous framework and the cooler are determined, and the Nusselt numbers were calculated. Using the example of calculating the actual design of a porous compact heat exchanger, the influence of initial parameters on hydrothermal characteristics was visually illustrated and key regularities were revealed. A significant influence of the diameter of porous carcass particles on the hydraulic resistance, the ratio of the height and width of the porous rib on the thermal picture was established. The obtained analytical solution qualitatively and quantitatively agrees with the experimental data obtained by other authors. The proposed toolkit can be used to develop modern designs of compact porous heat exchangers for various subject areas

**Key words:** intensification, porous heat exchanger, single-phase convective heat transfer

#### References

1. Delavar M.A., Azimi M. I. "Using porous for heat transfer enhancement in heat exchangers: review", *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2013, vol. 6, no. 1, pp. 14-16.
2. Bayomy A.M., Saghir M. Z. "Heat transfer characteristics of aluminum metal foam subjected to a pulsating / steady water flow: Experimental and numerical approach", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, vol. 97, pp. 318-336.
3. Vafai K. "Handbook of porous media", NY, CRC Press Taylor & Francis Group, 2005, 742 p.
4. Hung T.C., Hung Y.S., Yan W.M. "Design of porous-microchannel heat sinks with different porous configurations", *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 2016, vol. 4, no. 2, pp. 89-94.
5. Hooman K., Merrikh A.A. "Analytical solution of forced convection in a duct of rectangular cross section saturated by a porous medium", *Journal of Heat Transfer*, 2006, vol. 128, no. 6, pp. 596-600.
6. Hooman K., Gurgenci H., Merrikh A.A. "Heat transfer and entropy generation optimization of forced convection in porous-saturated ducts of rectangular cross-section", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, vol.50, no. 10, pp. 2051-2059.
7. Kurtbas I., Celik N. "Experimental investigation of forced and mixed convection heat transfer in a foam-filled horizontal rectangular channel", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, vol. 52, no. 9, pp. 1313-1325.
8. Nield D.A., Bejan A. "Convection in porous media", NY, Springer, 2006, 654 p.

9. Lu W., Zhao C.Y., Tassen S.A. "Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, vol. 49, no. 11, pp. 2751-2770.
10. Bear J., Bachmat Y. "Introduction to modeling of transport phenomena in porous media", Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1991, 553 p.
11. Hsu C.T., Cheng P. "Thermal dispersion in porous medium", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1990, vol. 33, no. 8, pp. 1587-1597.
12. Beji H., Gobin D. "Influence of thermal dispersion on natural convection heat transfer in porous media", *Numerical Heat Transfer, Part A*, 1992, vol. 22, pp. 487-500.
13. Gamal A.A., Furmanski P. "Problems of modeling flow and heat transfer in porous media", *Biuletyn Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej*, 1997, no. 85, pp. 55-88.
14. Amiri A., Vafai K. "Analysis of dispersion effects and non-thermal equilibrium, non-darcian variable porosity incompressible flow through porous media", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1994, vol. 37, no. 6, pp. 939-954.
15. Popov I.A. "Hydrodynamics and heat transfer in porous heat exchange elements and devices", Kazan', Tsentr innovatsionnykh tekhnologiy, 2007, 240 p.
16. Izadpanah M.R., Muller-Steinhagen H., Jamialahmadi M. "Experimental and theoretical studies of convective heat transfer in a cylindrical porous medium", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1998, vol. 19, pp. 629-635.
17. Slezkin N.A. "Dynamics of viscous incompressible fluid", Moscow, Gos. Izd-vo tekhniko-teoreticheskoy literatury, 1955, 579 p.
18. "Emerging technologies and techniques in porous media", NATO Advanced Study Institute, Series 2: Mathematic, Physics and Chemistry, vol.134, Springer Science + Business Media, B.V., 2004, 512 p.
19. Konovalov D.A., Ryazhskikh V.I., Ryazhskikh A.V., Boger A.A., Dakhin S.V. "Analytical solution to the problem of convective heat transfer in a porous rectangular channel for thermal boundary conditions of the second genus", *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software (Bulletin SUSU MMCS)*, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 40-53.
20. Konovalov D.A., Ryazhskikh V. I., Drozdov I.G. "Analytical solution of hydrodynamics and heat exchange problem in a porous rectangular channel for thermal boundary conditions of the second kind", *PTPPE-2017. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 891*, 2017, 012103.
21. Berd R., Stewart V., Lightfoot E. "Transfer phenomena", Moscow, Khimiya, 1975, 688 p.
22. Dzyubenko B.V., Kuzma-Kichta Yu.A., Leont'ev A.I., Fedik I.I., Kholpanov L.P. "Intensification of heat and mass transfer at the macro-, micro- and nanoscale", Moscow, FGUP «TsNIIATOMINFORM», 2008, 532 p.

Submitted 14.02.2018; revised 29.03.2018

#### Information about the authors

**Viktor I. Ryazhskikh**, Dr.Sci. (Physics and mathematics), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospect, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: ryazhskih\_vi@mail.ru  
**Dmitriy A. Konovalov**, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospect, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: dmikonvalov@yandex.ru  
**Aleksey Yu. Troshin**, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospect, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: troshinay@mail.ru

## ИНТЕГРАЦИЯ В АВТОМАТИЗИРОВАННУЮ СИСТЕМУ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ТИРИСТОРНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

© 2018 В.Н. Крысанов, К.В. Иванов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматривается возможность автоматизированной компенсации реактивной мощности в электроприводах насосов, включающих в себя асинхронные двигатели. В качестве примера рассматриваются газовые котельные для приготовления пара и горячей воды, находящиеся на балансе ОАО «Электросигнал». Приводятся описание котельной, состав используемого оборудования как по электромеханической части, так и по части автоматизации. Дано описание электромеханической части, в т.ч. все параметры электродвигателей насосов, и части автоматизации, где описываются мнемосхема, схема автоматизации управления насосами, цифровые приборы обработки информации и выдачи управляющих сигналов, приборы контроля и автоматизации системы управления технологическим процессом генерации пара. Рассматривается техническая возможность интеграции конденсаторных установок в существующую автоматизированную систему управления технологическим процессом (АСУТП). С целью уменьшения затрат на установку дополнительного оборудования приводится анализ зависимости потребляемой реактивной мощности от контролируемых технологических параметров (давления после насоса). Проведен анализ двух вариантов подключения конденсаторных батарей: регулируемых (многоступенчатых) и нерегулируемых (одноступенчатых), описаны алгоритмы их работы, недостатки и достоинства каждого варианта. Приводится теоретический расчет экономической эффективности интеграции рассмотренных компенсирующих устройств в существующие типовые АСУТП промышленных предприятий

**Ключевые слова:** компенсация реактивной мощности, тиристорные конденсаторные установки, АСУТП

### Введение

Использование в системах электроснабжения промышленных предприятий компенсирующих устройств является одним из самых эффективных методов снижения потерь электроэнергии. Наиболее целесообразна система распределенной компенсации реактивной мощности в точках преобразования энергии, включая объекты потребления электроэнергии. Уменьшение потерь активной мощности, обусловленных перетоками реактивных мощностей, является реальной эксплуатационной технологией энергосбережения в электрических сетях и технологией повышения эффективности использования электроэнергии (мощности) у потребителей. Реализация этого метода улучшает техникоэкономические показатели системы электроснабжения, так как при этом уменьшаются потоки реактивной мощности во всех элементах сети от источников питания до потребителей [1].

### Постановка задачи

Ниже будет рассмотрена возможность интеграции регулируемой конденсаторной установки в типовую АСУТП на примере газовой котельной ОАО «Электросигнал».

В котельной, установленной производительностью 7 т/ч, осуществляется выработка пара двумя паровыми котлоагрегатами WOLF Energy Solution Vapotherm-3500-9. Паровая котельная предназначена для отпуска насыщенного пара с избыточным давлением 0,4 Мпа ( $4 \text{ кгс/см}^2$ ) и температурой  $143^\circ\text{C}$  в объеме 4,8 т/ч пара для технологических нужд предприятия – разогрева гальванических ванн цеха гальванизации, поддержания их температуры в соответствии с технологическим графиком нагрузок. Котельная предназначена также для приготовления горячей воды для технологических нужд предприятия в объеме  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Система горячего водоснабжения – циркуляционная с непосредственным водоразбором. Режим работы котельной – односменный, круглогодичный.

На рис. 1 приведена мнемосхема котельной. Согласно мнемосхеме, можно проследить технологический процесс приготовления пара. Сырая вода с помощью двух насосов производительностью  $12 \text{ м}^3/\text{ч}$  с электродвигателями номинальной мощностью 2,2 кВт, номинальной частотой вращения 2900 об/мин и номинальным коэффициентом мощности 0,82 [2] подается в теплообменник, где подогревается паром из парового коллектора до необходимой температуры.

Далее подогретая вода поступает в деаэратор. Также к деаэратору подходят трубопроводы конденсата: с конденсатного бака и с производства. Два насоса производительностью 1,95 м<sup>3</sup>/ч с электродвигателями номинальной

мощностью 0,37 кВт, номинальной частотой вращения 1390 об/мин и номинальным коэффициентом мощности 0,7 [3] подают воду от конденсатного бака, аккумулирующего конденсат с теплообменников.

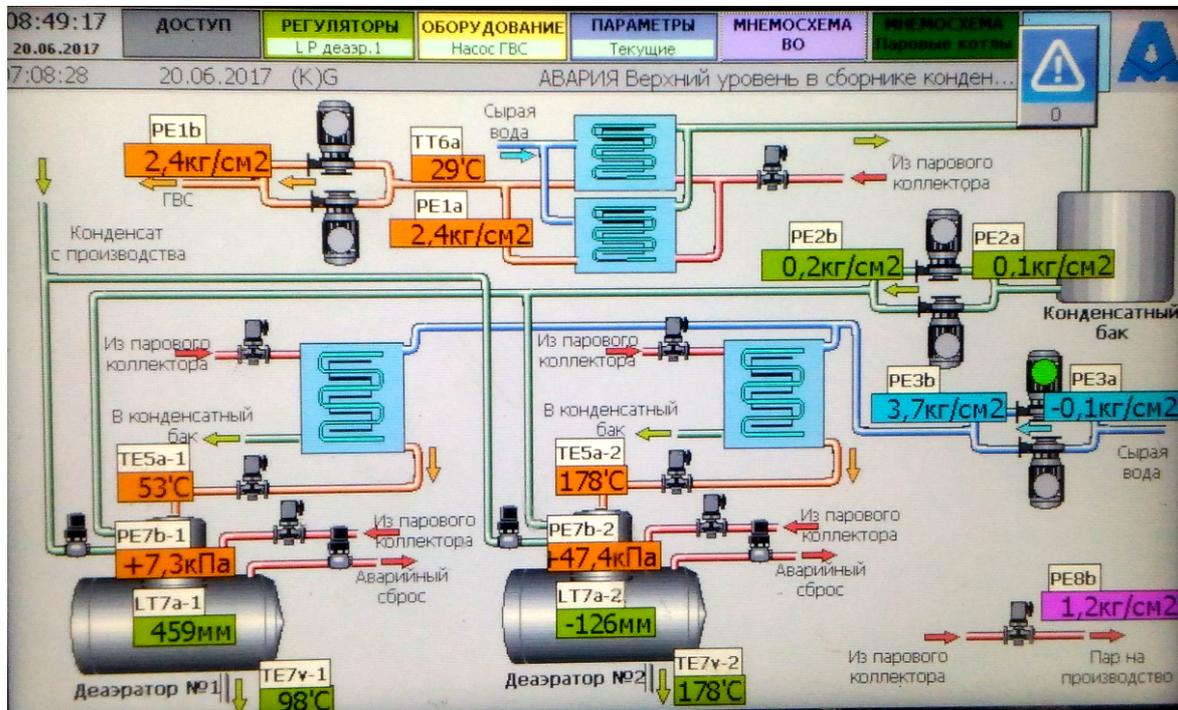


Рис. 1. Мнемосхема паровой котельной

Вода, прошедшая деаэрацию, поступает в газовый котел. Необходимое давление поддерживают собственные насосы котла, входящие в его состав и расположенные внутри. Котел преобразует питательную воду в пар, который поступает в паровой коллектор для дальнейшего разбора. В частности, для нужд горячего водоснабжения пар, проходя через теплообменники, отдает энергию тепла сырой воде, циркулирующей в системе ГВС благодаря двум насосам производительностью 10,2 м<sup>3</sup>/ч с электродвигателями номинальной мощностью 4 кВт, номинальной частотой вращения 2900 об/мин и номинальным коэффициентом мощности 0,87 [4].

Таким образом, в описанном выше технологическом процессе участвуют 6 асинхронных двигателей в составе электроприводов насосов. Данные электроприводы являются нерегулируемыми, поддержание заданных технологических параметров (давление, уровень) происходит благодаря запорно-регулирующим клапанам. Это приводит к изменению нагрузки на электродвигатели в течение суток и, как

следствие, изменению их коэффициента мощности.

На рис. 2 приведена схема автоматизации насосов.

Электроприводы насосов согласно рис. 2 имеют защиту по сухому ходу с использованием прессостатов, а также систему аварийного выключения в случае неисправности на основании двух манометров. Сигналы с манометров поступают в измеритель-регулятор ТРМ138, где преобразовываются в нормированные величины. Прибор ТРМ138 имеет аналоговые выходы по току 4...20 мА или напряжению 0...10 В, а также цифровой интерфейс RS-485. Далее сигналы с трех вышеописанных датчиков поступают на прибор для управления системой подающих насосов САУ-МП. Прибор САУ-МП предназначен для управления двумя циркуляционными насосами, поочередно работающими на одну магистраль, с возможностью аварийной сигнализации. На магистрали установлен датчик давления («сухой контакт»), подключаемый к входу прибора. Релейные выходы САУ-МП

осуществляют управление насосами. Если отказывают оба двигателя, на свободный

релейный выход выдается сигнал аварии, который передается в диспетчерскую.

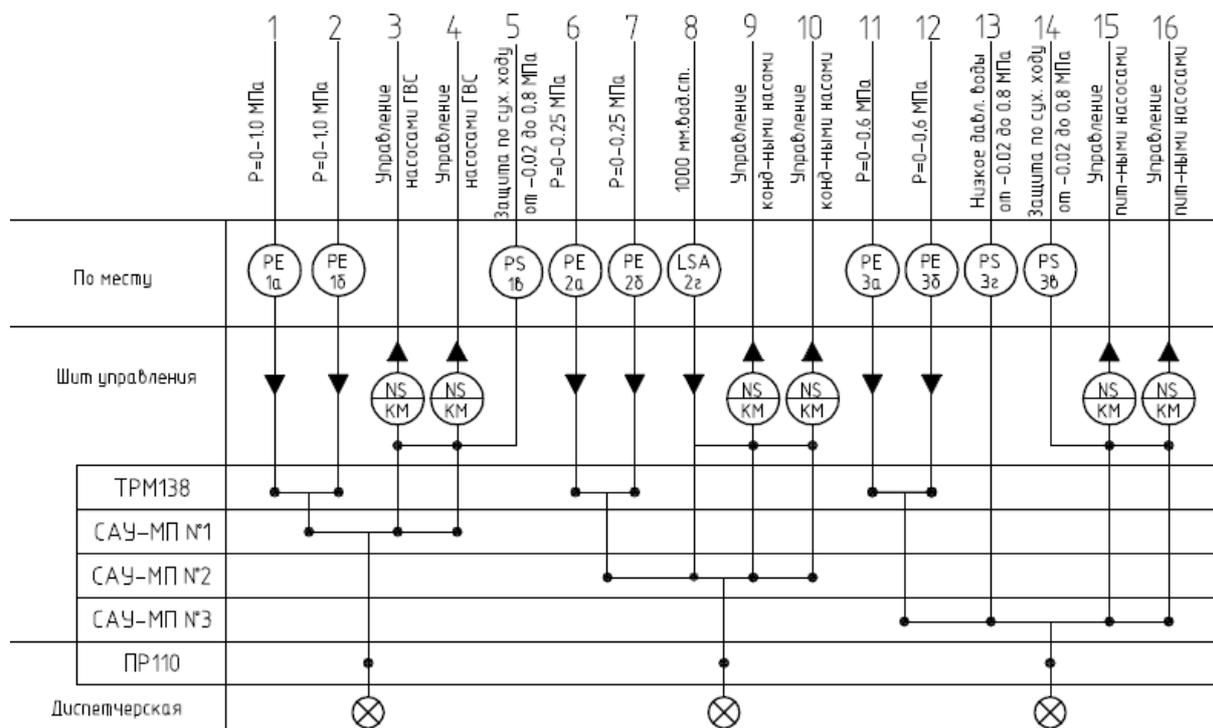


Рис. 2. Схема автоматизации управления насосами

В описанной выше АСУТП паровой котельной остается недоиспользованным измеритель-регулятор ТРМ138. С его помощью можно косвенно оценить необходимость дополнительной компенсации реактивной мощности в определенный момент времени.

При регулировании давления в трубопроводе дросселированием возрастает потребляемая мощность электродвигателей насосов. При этом если рабочая точка движется по характеристике за пределы номинального значения, то коэффициент мощности электродвигателя уменьшается, потребляется дополнительная реактивная мощность. Благодаря информации с датчика давления, установленного после насосов, существует возможность оценить степень нагрузки на электродвигатель: чем больше давление после насоса, тем больше закрыт запорно-регулирующий клапан, следовательно, больше нагружен электродвигатель. При этом необходимо знать уровень давления при номинальной нагрузке насоса, а также учесть форму зависимости напора от подачи.

### Интеграция компенсирующих устройств

Так как измерители-регуляторы ТРМ138 преобразуют сигнал с датчиков давления, а также имеют свободные релейные, логические и аналоговые выходы [5], то именно к ним целесообразно подключить конденсаторную установку для компенсации реактивной мощности.

В случае если согласно технологическому процессу в течение рабочей смены происходит частое изменение характеристик гидросети и, как следствие, изменение коэффициента мощности, то для пары насосов необходима отдельная конденсаторная установка.

Если конденсаторная установка имеет в своем составе несколько ступеней регулирования, то она может подключаться к нескольким измерителям-регуляторам одновременно, к дискретным выходам. В этом случае алгоритм ее работы будет следующим. Измеритель-регулятор при достижении значения давления после насоса определенной величины, которая задается при наладке, формирует на выходе сигнал на включение компенсирующего устройства. Блок управления конденсаторной установки принимает сигналы со всех измерителей-

регуляторов, преобразует в цифровое значение в зависимости от коэффициентов, характеризующих мощность электродвигателей насосов, и на его основе вырабатывается

команда на включение определенной ступени конденсатора. Схема алгоритма работы представлена на рис. 3.

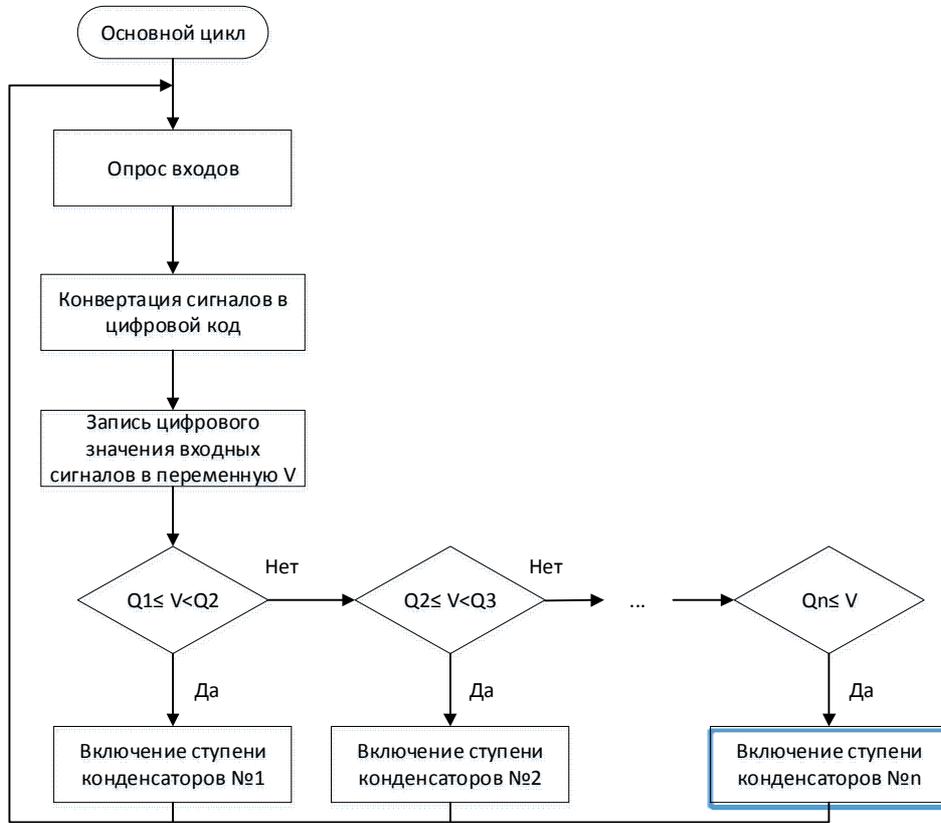


Рис. 3. Алгоритм работы многоступенчатой конденсаторной установки

На рис. 3 буквами Q1, Q2, Q3, Qn обозначены значения уставок для включения соответствующих ступеней регулирования.

Регулируемая конденсаторная установка способна более точно осуществлять компенсацию реактивной мощности, что становится актуально, когда технологический процесс предусматривает подключение разного количества потребителей в разное время. Из-за присутствия ступенчатого регулирования установка становится дороже.

Конденсаторная батарея, имеющая в своем составе один типоразмер силовых конденсаторов, подключается к логическому выходу измерителя-регулятора. При этом сигнал выставляется в логическую единицу при условии достижения значением давления определенной уставки. Данное значение уставки пропорционально значению потребляемой реактивной мощности электродвигателем насоса, которую необходимо скомпенсировать. Блок управления

обрабатывает логический сигнал и выдает команду на включение конденсаторной батареи.

Такой тип установок дешевле, чем регулируемые, однако его использование целесообразно при повторных коммутациях только постоянной нагрузки с определенным заранее значением.

В обоих случаях система управления конденсаторной батареей способна передавать сигнал о текущем состоянии на следующий уровень АСУТП предприятия: либо с помощью дискретных выходов, либо по цифровому интерфейсу.

На примере рассмотренной выше котельной для приготовления пара и горячей воды с учетом описанных алгоритмов, можно сделать вывод о возможности интеграции конденсаторной батареи с микропроцессорным управлением в существующую АСУТП.

### Заключение

На примере рассмотренной выше котельной для приготовления пара и горячей воды, с учетом описанных алгоритмов, можно сделать вывод о возможности интеграции конденсаторной батареи с микропроцессорным управлением в существующую АСУТП. Что касается эффективности такой интеграции, то ее уровень значительно повышается в случае использования для технологических нужд более мощных электроприводов. Поэтому целесообразно использовать описанные выше технологии и для второй котельной данного предприятия, которая предназначена для получения горячей воды с температурой 150°C, используемой в системах отопления, вентиляции и горячего водоснабжения промышленного и бытового назначения, а также для технологических целей.

В настоящее время на котельной установлены 4 однотипных сетевых насоса ЦН 400-105, приводимые асинхронными двигателями 4АМН-315S-4У.

Производительность насоса – 250-500 м. куб./ч при напоре 120-92,5 м. в. ст. Номинальная мощность приводного асинхронного двигателя – 200 кВт при скорости вращения вала 1470 об/мин, номинальный коэффициент мощности равен 0,91 [6]. Регулирование напора, создаваемого насосами, осуществляется с помощью регулируемой задвижки, запрограммированной по суточному потреблению. Использование задвижки влияет на режим работы электродвигателей, тем самым изменяя потребляемую реактивную мощность и  $\cos\varphi$ .

Данная котельная также нуждается в автоматизации с целью повышения производительности и энергосбережения. За основу АСУТП можно взять уже реализованный проект паровой котельной. При этом экономический эффект от установки компенсирующих устройств будет заметно выше из-за отличающейся на 2 порядка

мощности асинхронных двигателей – основных потребителей реактивной мощности.

Исходя из расчета, что данные насосы работают в течение отопительного сезона (примерно 196 дней) круглосуточно, время их работы составит 4704 ч в год. При этом учтем, что одновременно работают 3 насоса и один остается в резерве. Таким образом, годовое потребление электроэнергии составит 2822400 кВт·ч. Так как потери активной мощности обратно пропорциональны квадрату коэффициента мощности передаваемой нагрузки при неизменных остальных параметрах, то при максимальной компенсации получаем снижение активных потерь на 20,8%. В годовом выражении снижение потерь составит 587059 кВт·ч. Таким образом, при тарифе 4,06 р/кВт·ч экономия составит 2,4 млн. р/год.

### Литература

1. Паули В.К., Воротников Р.А. Компенсация реактивной мощности как эффективное средство рационального использования электроэнергии // Энергоэксперт. 2007. № 2. С. 16-19.
2. Насос Wilo-VeroLine-IPL 40/130-2,2/2 // Промышленные, циркуляционные насосы и насосные станции WILO. URL: <http://xn--b1amjm.xn--p1ai/index.php?ukey=product&productID=5225> (дата обращения 12.03.2018).
3. NBG 50-32-200.1/196 A-F2-B-BAQE - 99117456 // Grundfos product center. URL: <https://product-selection.grundfos.com/product-detail.product-detail.html?custid=GMA&productnumber=99117456&qcid=340683293> (дата обращения 12.03.2018).
4. Насос Wilo-VeroLine-IPL 40/160-4/2 // Промышленные, циркуляционные насосы и насосные станции WILO. URL: <http://xn--b1amjm.xn--p1ai/index.php?ukey=product&productID=5228> (дата обращения 12.03.2018).
5. ТРМ212 ПИД-регулятор для управления задвижками и трехходовыми клапанами с RS-485 // Овен. Оборудования для автоматизации. URL: [http://www.owen.ru/catalog/pid\\_regulyator\\_dlya\\_upravleniya\\_zadvizhkami\\_i\\_klapanami\\_s\\_rs\\_485\\_owen\\_trm212/23527548](http://www.owen.ru/catalog/pid_regulyator_dlya_upravleniya_zadvizhkami_i_klapanami_s_rs_485_owen_trm212/23527548) (дата обращения 12.03.2018).
6. Двигатели асинхронные серии 4АМ габаритов 280, 315, 355 // Технические характеристики промышленного оборудования. URL: <http://electro.mashinform.ru/dvigateli-asinhronnye-serii-dvigateli-asinhronnye-serii-4am-gabaritov-280-315-355-obj3889.html> (дата обращения 12.03.2018).

Поступила 05.02.2018; принята к публикации 29.03.2018

### Информация об авторах

**Крысанов Валерий Николаевич** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: sovteh2000@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1111-8402>

**Иванов Константин Владимирович** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: Dharma\_lost@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6942-3181>

## INTEGRATION OF TYRISTOR COMPENSATORS OF REACTIVE POWER INTO AUTOMATED PROCESS CONTROL SYSTEM OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

V.N. Krysanov, K.V. Ivanov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the possibility of automated compensation of reactive power in electric drives of pumps, including asynchronous motors, is considered. As an example, gas boilers for the preparation of steam and hot water, which are on the balance of ALC Electrosignal, are considered. The description of the boiler house, the electromechanical and automation structure of the equipment used are given. The description is given of the electromechanical part, including all parameters of pump motors, and automation parts, where the following things are described: the mnemonic diagram, the pump control automation scheme, digital information processing and control signals issuing devices, control devices and automation of the process control system for steam generation. The technical possibility of integrating condensing installations into the existing process control system is considered. In order to reduce the cost of installing additional equipment, an analysis is made of the dependence of the reactive power consumed on the monitored process parameters (pressure after the pump). The analysis of two variants of connection of capacitor batteries: adjustable (multistage) and unregulated (single-stage), the algorithms of their operation, the disadvantages and advantages of each option are described. The theoretical calculation of the economic efficiency of integration of the compensating devices considered in the existing standard process control systems of industrial enterprises is given

**Key words:** reactive power compensation, thyristor condensing installations, industrial control

### References

1. Pauli V.K., Vorotnikov R.A. "Compensation of reactive power as an effective means of rational use of electricity", *Energy expert (Energoekspert)*, 2007, vol. 2, pp. 16-19.
2. The pump Wilo-VeroLine-IPL 40/130-2,2/2, Industrial, circulating pumps and pumping stations WILO (Promyshlennye, tsirkulyatsionnye nasosy i nasosnye stantsii WILO), available at: <http://xn--b1amjm.xn--p1ai/index.php?ukey=product&productID=5225>
3. NBG 50-32-200.1/196 A-F2-B-BAQE – 99117456, Grundfos product center, available at: <https://product-selection.grundfos.com/product-detail.product-detail.html?custid=GMA&productnumber=99117456&qcid=340683293>.
4. Pump Wilo-VeroLine-IPL 40/160-4/2, Industrial, circulating pumps and pumping stations WILO (Promyshlennye, tsirkulyacionnye nasosy i nasosnye stantsii WILO), available at: <http://xn--b1amjm.xn--p1ai/index.php?ukey=product&productID=5228>.
5. TRM212 PID controller for control of valves and three-way valves with RS-485, Oven. Automation equipment (Oven. Oborudovaniya dlya avtomatizatsii), available at: [http://www.owen.ru/catalog/pid\\_regulyator\\_dlya\\_upravleniya\\_zadvizhkami\\_i\\_klapanami\\_s\\_rs\\_485\\_owen\\_trm212/23527548](http://www.owen.ru/catalog/pid_regulyator_dlya_upravleniya_zadvizhkami_i_klapanami_s_rs_485_owen_trm212/23527548).
6. Asynchronous motors of 4AM dimensions 280, 315, 355, Technical characteristics of industrial equipment (Tekhnicheskie kharakteristiki promyshlennogo oborudovaniya), available at: <http://electro.mashinform.ru/dvigateli-asinhronnye-serii-/dvigateli-asinhronnye-serii-4am-gabaritov-280-315-355-obj3889.html>.

Submitted 05.02.2018; revised 29.03.2018

### Information about the authors

**Valeriy N. Krysanov**, Cand. Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovsky prospect, Voronezh 394026, Russia), e-mail: [sovteh2000@mail.ru](mailto:sovteh2000@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1111-8402>

**Konstantin V. Ivanov**, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovsky prospect, Voronezh 394026, Russia), e-mail: [Dharma\\_lost@bk.ru](mailto:Dharma_lost@bk.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6942-3181>

## ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ЯДЕРНЫМИ БЛОКАМИ

© 2018 В.П. Поваров

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассмотрены современные принципы разработки систем принятия решений в условиях реального времени с использованием СПРИНТ-технологии, базирующейся на методах, реализуемых в рамках проблематики экспертных систем. Рассмотрена архитектура типовой системы принятия решений в задачах управления энергоблоками атомной электростанции (АЭС). Ключевым моментом в приведенном исследовании является то, что применен метод декомпозиции энергоблока на диагностические компоненты — технологические системы, т.е. объект разбивается на несколько функционально-законченных подсистем. Далее на каждую отдельную подсистему заводятся своя база знаний (БЗ) и база данных (БД). В результате этих действий появляется возможность работы с каждой подсистемой отдельно. Данное разбиение позволяет распараллелить обработку знаний, что особенно важно в системах реального времени. В случае, когда задействовано сразу несколько подсистем, для объединения и обработки такой распределенной информации используются БД и БЗ верхнего блочного уровня. Приведен алгоритм контроля состояния энергоблока, оборудования, параметров рабочей среды, обеспечивающий прием и обработку информации от штатных информационных систем внутриреакторного контроля (СВРК) и УРАН, функционирующих в настоящее время на энергоблоках Калининской и Нововоронежской АЭС

**Ключевые слова:** система принятия решений, база данных, база знаний, СПРИНТ-технология, алгоритм контроля

### Введение

Современные системы управления атомными станциями представляют собой сложные программно-технические комплексы, позволяющие операторам в условиях реального времени (РВ) принимать решения, обеспечивающие безопасное функционирование ядерного блока. Одним из подходов к разработке систем принятия решений (СПР) является СПРИНТ-технология, базирующаяся на методах и принципах, реализуемых в рамках проблематики экспертных систем (ЭС).

СПР СПРИНТ-РВ как система поддержки оператора (СПО) — это компьютеризированная система, состоящая из комплекса технических, программных и организационных средств, предназначенная для приема и обработки контролируемых аналоговых и дискретных параметров состояния АЭС с целью получения и представления обобщенной или детальной текущей информации как о функционировании АЭС в целом, так и о поведении отдельных подсистем, а также выдаче советов дежурной смене в тех режимах, где это предусмотрено эксплуатационными документами.

### Архитектура типовой СПР на основе СПРИНТ-технологии

Разработка СПР для эксплуатации энергоблоков АЭС обладает целым рядом

особенностей, основные из которых — слабая структуризация проблем предметной области и необходимость принятия решений в условиях неполной и нечеткой исходной информации.

СПРИНТ-технология поддерживает представление знаний в виде правил, фреймов, семантической сети и имеет набор вспомогательных инструментов для создания, тестирования и внедрения приложений. Это позволяет описывать процессы принятия решений в открытых и динамических проблемных областях.

Ключевым моментом данной технологии является предоставляемая пользователю возможность самостоятельно разбивать приложение на отдельные задачи, модули (источники знаний). Это достигается за счет использования архитектуры Рабочей Области (РО). РО — часть системы, которая используется для хранения данных и знаний и является доступной: по чтению — всем задачам и источникам знаний, по записи — задачам и ИЗ, получившим разрешение у Администратора БД и БЗ. Объекты, помещаемые в РО, могут являться измеряемыми, расчетными данными, промежуточными результатами, гипотезами, вариантами или окончательными решениями.

Архитектура типовой СПР на основе СПРИНТ-технологии представлена на рис. 1 [1].

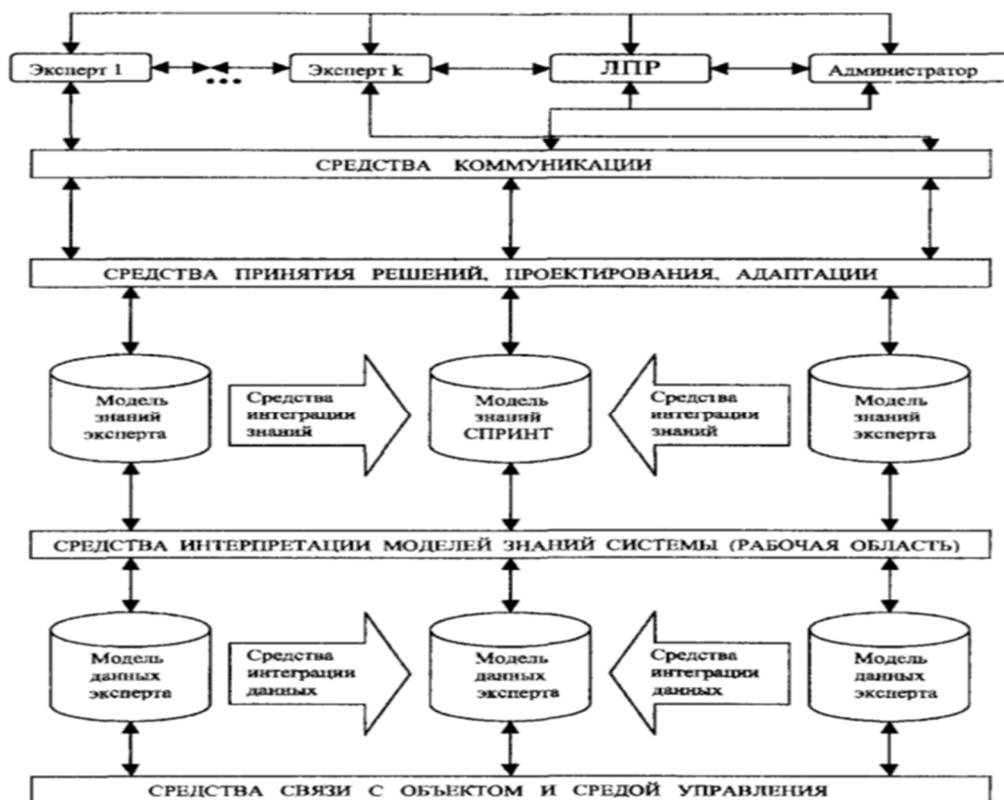


Рис. 1. Архитектура типовой СПР на основе СПРИНТ-технологии

Атомная электростанция как объект человеко-машинного управления состоит из нескольких энергетических установок: реактор, турбина, генератор и вспомогательные системы. Очевидно, что такой объект, подвергающийся диагностике со стороны системы поддержки принятия решений, может иметь достаточно сложную архитектуру со многими тысячами взаимосвязей, отследить которые в одной базе знаний достаточно трудно. Поэтому логично разбить сложный объект на более простые составляющие и организовать анализ их состояния. Иными словами, в СПРИНТ-технологии разработки СПР для задач управления АЭС применен метод декомпозиции энергоблока на диагностические компоненты — *технологические системы*, т.е. объект разбивается на несколько функционально-законченных подсистем [2]. Далее на каждую отдельную подсистему заводятся своя база знаний и база данных. В результате этих действий появляется возможность работы с каждой подсистемой отдельно. Данное разбиение позволяет распараллелить обработку знаний, что особенно важно в системах реального времени.

В случае, когда задействовано сразу несколько подсистем, для объединения и обработки такой распределенной информации

используются БД и БЗ верхнего блочного уровня [3].

### Функциональная структура системы поддержки оператора в СПРИНТ-технологии реального времени

Функциональная структура системы поддержки оператора СПО СПРИНТ-РВ реализованная на 5 блоке Нововоронежской АЭС приведена на рис. 2 [4]. В рамках этой структуры предполагается, что вышеописанные функции по анализу действия защит и блокировок, поддержки параметров безопасности, контролю критических функций и анализу действия оператора по симптомно-ориентированным инструкциям, а также другие предметно-ориентированные функции представляются в системе в виде моделей, погружаемых в оперативные и неоперативные базы знаний. Результат работы системы с этими моделями предьявляется операторам дежурной смены через блоки:

- выявления аномалий и классификация аномалий;
- диагностирования причин возникновения аномалий;
- поиска управляющих решений;
- прогнозирования событий и направлений развития аномалий;

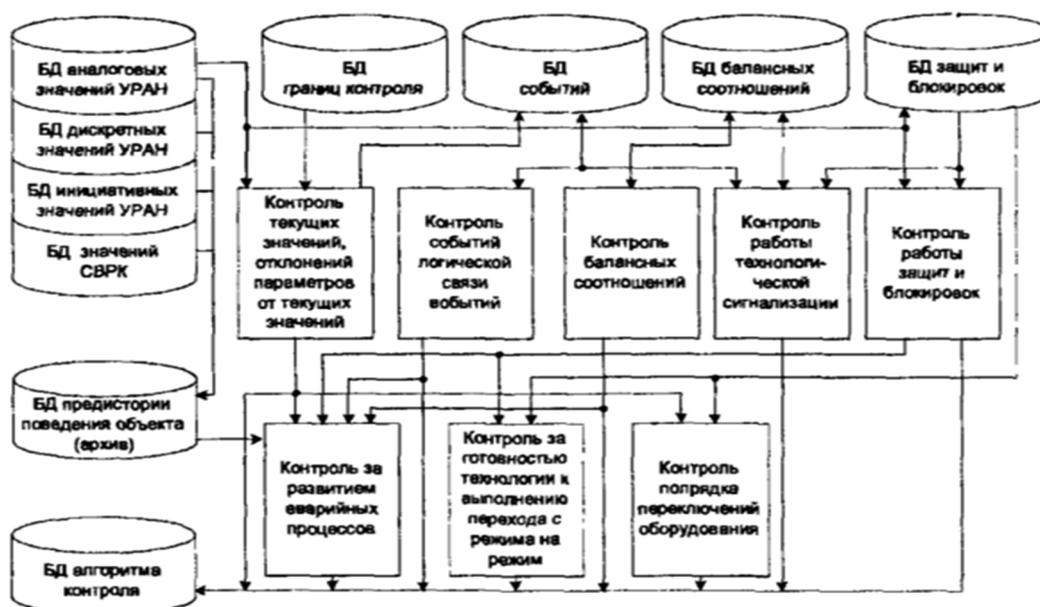


Рис. 2. Структура системы контроля состояния энергоблока, оборудования, параметров рабочей среды

- графической поддержки принимаемых решений;
- контроля правильности действий оперативного персонала;
- помощи в режимах пуска/останова.

Вышерассмотренная композиция функциональных блоков СПО базируется на следующих информационном компонентах:

- оперативных базах данных;
- неоперативных базах данных;
- оперативных базах знаний;
- неоперативных базах знаний;
- графических базах данных;
- оперативных архивах;
- базах данных по отказам оборудования;
- базах данных прогноза.

Функции, поддерживающие вышеперечисленные блоки, включают в себя:

- функции выявления аномалий, классификации аномалий;
- функции диагностирования причин возникновения аномалий;
- функции контроля параметров технологического процесса;
- функции поиска управляющих решений;
- функции контроля правильности действий оперативного персонала и помощи в режимах пуска/останова;
- функции прогнозирования событий;
- функции сжатия данных технологической информации;
- функции графической поддержки принимаемых решений.

### Алгоритм контроля состояния энергоблока, оборудования, параметров рабочей среды

Алгоритм контроля состояния энергоблока, оборудования, параметров рабочей среды реализован на основе структуры СПР (рис. 2) и обеспечивает прием и обработку информации от штатных информационных систем внутривреакторного контроля (СВРК) и УРАН, функционирующих в настоящее время на энергоблоках Калининской и Нововоронежской АЭС.

Функционал данного алгоритма представляет собой композицию следующих шагов:

ШАГ 1. Контроль текущих значений, отклонений параметров от текущих значений;

ШАГ 2. Контроль событий, логической связи событий.

ШАГ 3. Контроль балансных соотношений.

ШАГ 4. Контроль работы технологической сигнализации.

ШАГ 5. Контроль работы защит и блокировок.

ШАГ 6. Контроль за развитием аварийных процессов.

ШАГ 7. Контроль за готовностью технологии к выполнению перехода с режима на режим.

ШАГ 8. Контроль порядка переключения оборудования.

Принцип работы настоящего алгоритма

заключается в организации квазипараллельной обработки баз данных, поступающих со штатных информационных систем УРАН, АСУТП и СВРК, а также обработки оперативных архивов энергоблока.

Для поддержки функционирования рассмотренного выше алгоритма используются следующие структуры данных: базы данных границ контроля, базы данных событий, базы данных балансных соотношений, базы данных защит и блокировок, базы данных алгоритма контроля.

Приведенный алгоритм позволяет сформировать все необходимые для поддержки принятия оперативных решений исходные разделы баз данных.

### Заключение

В ходе проведенных исследований, связанных с разработкой концепции построения систем принятия решения в задачах управления процессами функционирования ядерных блоков АЭС, был сделан вывод о необходимости применения СПРИНТ-технологии как наиболее эффективного подхода при создании таких инструментальных средств. Рассмотренные в статье принципы

организации СПР РВ были реализованы в системе оперативного управления 5 и 6 блока НВ АЭС. В настоящее время данный подход рассматривается в качестве основы при создании интеллектуальных систем непрерывного мониторинга параметра состояний ядерных энергетических установок.

### Литература

1. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в нестандартных ситуациях с использованием информации о состоянии природной среды /В.А. Геловани и др. М.: Эдиториал УРСС, 2001. 304 с.
2. Поваров В.П., Бакиров М.Б., Данилов А.Д. Автоматизированная система многопараметрического мониторинга параметров состояния энергетических установок АЭС. Воронеж: Научная книга, 2017. 244 с.
3. Данилов А.Д., Пилеич А.В. Математическое обеспечение распределенных вычислений гетерогенных динамических параметров систем в режиме реального времени. Воронеж: ВГТУ, 2015. 160 с.
4. Данилов А.Д., Головнев В.Н. Цифровые системы управления. Воронеж: ВГЛТА, 2007. 235 с.
5. Данилов А.Д. Микропроцессорные элементы и устройства локальной автоматики. Воронеж: ВГЛТА, 2005. 267 с.
6. Данилов А.Д. Технические средства автоматизации. Воронеж: ВГЛТА, 2007. 340 с.

Поступила 29.01.2018; принята к публикации 29.03.2018

### Информация об авторах

**Поваров Владимир Петрович** – канд. техн. наук, зав. кафедрой автоматизации и систем управления объектами атомной энергетики, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: tmk\_ep@mail.ru

## PRINCIPLES OF DEVELOPMENT OF DECISION-MAKING SYSTEMS IN NUCLEAR BLOCK CONTROL PROBLEMS

V.P. Povarov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the modern principles of development of decision-making systems in real-time conditions using SPRINT-technology, based on methods implemented within the framework of the problematic of expert systems, are considered. The architecture of a typical decision-making system in the tasks of managing power units of a nuclear power plant (NPP) is considered. The key point of the study is that it applies the method of decomposition of the power unit into diagnostic components - technological systems, i.e. the object is divided into several functionally completed subsystems. Further on, each separate subsystem has its own knowledge base (KB) and database (DB). As a result of these actions, it becomes possible to work with each subsystem separately. This partitioning allows to parallelize the processing of knowledge, which is especially important in real-time systems. In the case when several subsystems are involved at once, the KB and the DB of the upper block level are used for combining and processing such distributed information. The algorithm for monitoring the condition of the power unit, equipment, parameters of the working environment is provided, which ensures the reception and processing of information from the in-house information systems of the in-reactor control (SIRC) and UРАН, currently operating on the power units of the Kalinin and Novovoronezh NPPs

**Key words:** decision-making system, database, knowledge base, SPRINT-technology, control algorithm

### References

1. Gelovani V.A. "Intellectual systems of decision-making support in emergency situations using information about the state of the environment" ("Intellektual'nye sistemy podderzhki prinyatiya resheniy v neshtatnykh situatsiyakh s ispol'zovaniem informatsii o sostoyanii prirodnoy sredy"), Moscow, Editorial URSS, 2001, 304 p.
2. Povarov V.P., Bakirov M.B., Danilov A.D. "Automated system for multiparameter monitoring of the parameters of the state of nuclear power plants" ("Avtomatizirovannaya sistema mnogoparametricheskogo monitoringa parametrov sostoyaniya energeticheskikh ustanovok AES"), Voronezh, Nauchnaya kniga, 2017, 244 p.
3. Danilov A.D., Pileich A.V. "Mathematical support of distributed computing of heterogeneous dynamic parameters of systems in real time" ("Matematicheskoe obespechenie raspredelennykh vychisleniy geterogennykh dinamicheskikh parametrov sistem v rezhime real'nogo vremeni"), Voronezh, Voronezh State Technical University, 2015, 160 p.
4. Danilov A.D., Golovnev V.N. "Digital control system" ("Tsifrovye sistemy upravleniya"), Voronezh, Voronezh State University of Forestry and Technologies, 2007, 235 p.
5. Danilov A.D. "Microprocessor elements and local automation devices" ("Mikroprotsessornye elementy i ustroystva lokal'noy avtomatiki"), Voronezh, Voronezh State University of Forestry and Technologies, 2005, 267 p.
6. Danilov A.D. "Technical means of automation" ("Tekhnicheskie sredstva avtomatizatsii"), Voronezh, Voronezh State University of Forestry and Technologies, 2007, 340 p.

Submitted 29.01.2018; revised 29.03.2018

### Information about the author

**Vladimir P. Povarov**, Cand.Sci. (Technical), Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: [tmk\\_ep@mail.ru](mailto:tmk_ep@mail.ru)

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ УЧАСТКА ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

© 2018 Л.В. Булыгина<sup>1</sup>, В.И. Ряжских<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Дочернее открытое акционерное общество «Газпроектинжиниринг», г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup> Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассмотрена проблема повышения энергоэффективности компрессорных станций (КС). Исследовано влияние температурного режима на выходе компрессорной станции на энергоэффективность работы участка газотранспортной системы (ГТС). Выполнен анализ изменения теплового режима на участке ГТС, состоящем из последовательно расположенных линейных участков магистрального газопровода (МГ) и компрессорных станций. Проведен эксперимент по оценке влияния температуры на выходе компрессорной станции на локальную и системную энергоэффективность последующих КС. В качестве объекта исследования выбран участок ГТС с тремя линейными КС и установленными на них газотурбинными газоперекачивающими агрегатами ГПА-16 (со схемой работы 3х1+1). Выполнен теплогидравлический расчет, моделирование и анализ режимов работы участка газотранспортной системы с компрессорными станциями по критериям энергоэффективности. В качестве критериев энергоэффективности были приняты показатели годового объема потребления топливного газа (ТГ) на рассматриваемом участке ГТС и значения потребляемой мощности компрессорных станций. Рассмотрены технические аспекты использования и возможности регулирования температуры на выходе компрессорной станции за счет применения аппаратов воздушного охлаждения (АВО) газа. Применение результатов исследования температурного режима на выходе КС позволит повысить энергоэффективность работы участка ГТС, уменьшить потребляемую мощность компрессорных станций и снизить затраты топливного газа

**Ключевые слова:** компрессорная станция, энергоэффективность, газоперекачивающий агрегат, аппарат воздушного охлаждения газа

### Введение

Решение задачи обеспечения энергоэффективной работы Единой системы газоснабжения (ЕСГ) России невозможно без обеспечения энергоэффективности и оптимизации режимов работы КС, так как компрессорные станции являются основными потребителями топливно-энергетических ресурсов.

Компрессорная станция (рис. 1) является сложной энергетической системой, на которой осуществляются технологические процессы очистки, осушки, компримирования и охлаждения природного газа. Главное назначение компрессорной станции - обеспечение проектной или плановой производительности газопровода за счет повышения давления транспортируемого газа [1].

Оборудование и обвязка компрессорной станции приспособлены к переменному режиму работы газопровода и самой КС. Количество газа, перекачиваемого через КС, регулируется в основном включением и отключением числа работающих агрегатов, изменением частоты вращения силовой турбины у ГПА с газотурбинным типом привода. При повышении давления газа на ГПА происходит

увеличение температуры газа. Для обеспечения безаварийного режима работы КС газ охлаждают в АВО газа до температуры не выше 45 °С. При этом важно не только обеспечить технологический режим, но и выбрать оптимальные термобарические параметры работы компрессорного цеха.

Регулирование термобарических параметров [1] происходит в зависимости от изменения:

- количества работающих ГПА на КС;
- фактического числа оборотов ротора каждого центробежного нагнетателя (ЦБН);
- количества включенных вентиляторов в АВО газа.

В работе [2] было исследовано влияние давления на выходе компрессорной станции на локальную и системную энергоэффективность. В результате проведенного анализа и расчетов режимов работы участка ГТС было выявлено, что поддержание давления нагнетания вблизи максимально-допустимых значений позволяет снизить потери по длине трубопровода, увеличить входное давление на следующей КС и снизить необходимую степень сжатия, тем самым уменьшая потребляемую мощность, объемы потребления топливного газа и увеличивая энергоэффективность работы ГТС.



Рис. 1. Компрессорная станция природного газа

Рассмотрим влияние температурного режима КС на энергоэффективность работы ГТС. Газ поступает на компрессорную станцию из магистрального газопровода, проходит очистку и осушку и поступает на компримирование в ГПА. Таким образом, видно, что температура на входе в компрессорный цех (КЦ) равна температуре на выходе предшествующего линейного участка МГ. Возможности регулирования температуры на входе в КЦ нет. После компримирования в ГПА температура газа повышается, и газ идет на охлаждение в АВО. Температурный режим на выходе АВО головной КС не будет влиять на локальную (собственную) энергоэффективность КС и потребление ТГ. Однако температурный режим на выходе КС будет влиять на энергоэффективность следующих КС и системную энергоэффективность участка ГТС. Под системной энергоэффективностью понимается энергоэффективность газотранспортной системы с учетом энергетической взаимозависимости входящих в неё объектов и режима их совместной работы (энергетический вклад каждого объекта в работу системы) [3].

Рассмотрим регулирование температуры на КС в АВО газа, а также влияние температурного режима на выходе КС на энергоэффективность следующих КС и системную энергоэффективность участка ГТС.

### Охлаждение газа в АВО

Схемы с использованием аппаратов воздушного охлаждения (АВО) получили наибольшее распространение на КС (рис. 2).

Принцип работы АВО следующий: на опорных металлоконструкциях закреплены трубчатые теплообменные секции. По трубам теплообменной секции пропускают транспортируемый газ, а через межтрубное пространство теплообменной секции с помощью вентиляторов, приводимых во вращение от электромоторов, прокачивают наружный воздух. За счет теплообмена между нагретым при компримировании газом, движущимся в трубах, и наружным воздухом, движущимся по межтрубному пространству, и происходит охлаждение технологического газа на КС.

Степень охлаждения природного газа ограничивается температурой наружного воздуха, что особенно сказывается в летний период эксплуатации. Температура газа после охлаждения в АВО не может быть ниже температуры наружного воздуха.

Установка воздушного охлаждения газа состоит из однотипных аппаратов воздушного охлаждения, соединенных между собой параллельно трубопроводной обвязкой.

Применяют следующие способы регулирования АВО газа [4]:

- воздействие на производительность вентиляторов;
- жалюзирование поверхности теплообмена;
- включение-отключение вентиляторов;
- рециркуляция охлаждающего воздуха перед теплообменными секциями АВО газа;
- перепуск части технологического потока по байпасным линиям;
- увлажнение охлаждающего воздуха и поверхности теплообменных секций АВО газа.

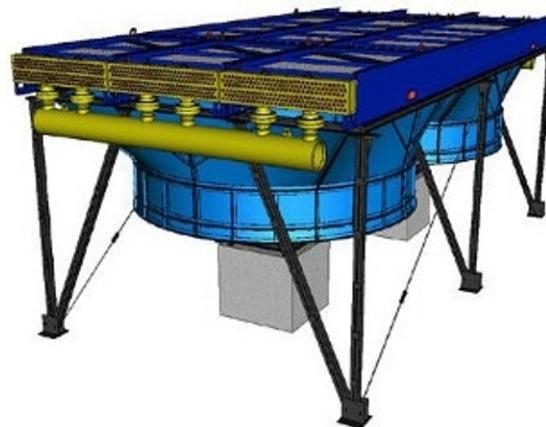


Рис. 2. Аппарат воздушного охлаждения газа

Регулирование воздействием на производительность вентиляторов возможно путем изменения частоты вращения электродвигателей вентиляторов и изменения угла поворота лопастей вентиляторов.

### Анализ изменения температурного режима на участке ГТС

Для исследования влияния выходного температурного режима КС на энергоэффективность ГТС проведем анализ изменения температурного режима на участке магистрального газопровода.

Изменение температуры на участке ГТС:

- в компрессорном цехе при сжатии газа на ГПА происходит повышение температуры газа;
- при поступлении на АВО газ охлаждается, понижается температура газа;
- на линейном участке (ЛУ) газопровода за счет эффекта Джоуля-Томсона происходит снижение температуры газа;
- на ЛУ газопровода за счет теплообмена с окружающей средой.

Теплогидравлический режим течения природного газа можно описать следующей системой дифференциальных уравнений [5]:

$$\begin{cases} \frac{\partial G}{\partial t} = -|v| \frac{\partial G}{\partial x} - S \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{|v|\lambda}{2D} G - S\rho g \sin \alpha, \\ \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{\frac{\partial p}{\partial p}} \frac{\partial G}{\partial x}, \\ \frac{dT}{dx} = D_p \cdot \frac{dp}{dx} + \frac{\pi K D}{C_p G} (T_0 - T) - \frac{g}{C_p} \cdot \sin \alpha, \end{cases} \quad (1)$$

где  $G$  – массовый расход, кг/с;  $x$  – текущая координата длины газопровода, м;  $p$  – давление газа, МПа;  $T$  – температура газа, К;  $T_0$  – расчетная температура окружающей среды, К;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $S$  – площадь поперечного сечения газопровода, м<sup>2</sup>;  $K$  – коэффициент теплопередачи от газа в окружающую среду, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $D$  – диаметр газопровода, м;  $v$  – скорость газа, м/с;  $D_p$  – коэффициент Джоуля-Томсона, К/МПа;  $C_p$  – средняя изобарная теплоемкость газа, кДж/кг К;  $\alpha$  – угол наклона газопровода к горизонту.

Для установившегося режима течения с постоянным расходом газа по сечению трубопровода следует, что  $\frac{\partial G}{\partial t} = 0$ ,  $\frac{\partial p}{\partial t} = 0$ ,

$\frac{\partial G}{\partial x} = 0$ , а также, с учетом отсутствия уклона газопровода, система принимает вид:

$$\begin{cases} S \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{|v|\lambda}{2D} G, \\ \frac{dT}{dx} = D_p \cdot \frac{dp}{dx} + \frac{\pi K D}{C_p G} (T_0 - T). \end{cases} \quad (2)$$

Для упрощения теплогидравлических расчетов участка ГТС воспользуемся эмпирическими уравнениями, приведенными в [6]. Температура газа  $T$  в любой точке однониточного газопровода при любом способе прокладки определяется по формуле:

$$T = T_0 + (T_n - T_0)e^{-ax} - D_i \frac{P_n^2 - P_k^2}{2aL P_{cp}} (1 - e^{-ax}), \quad (3)$$

$$a = 225,5 \cdot \frac{K_{cp} \cdot d}{q \cdot \Delta \cdot C_p \cdot 10^6}, \quad (4)$$

где  $T_0$  – расчетная температура окружающей среды, К;  $T_n$  – температура газа в начале участка газопровода, К; при отсутствии охлаждения газа на КС температуру  $T_n$  следует принимать равной температуре газа на выходе из компрессорного цеха, при наличии охлаждения газа величина  $T_n$  принимается равной температуре газа на выходе из системы охлаждения;  $P_n, P_k$  – соответственно, начальное и конечное абсолютные давления газа на участке, МПа;  $P_{cp}$  – среднее давление газа на участке, МПа;  $x$  – расстояние от начала газопровода до рассматриваемой точки, км;  $d_n$  – наружный диаметр газопровода, мм;  $K_{cp}$  – средний на участке общий коэффициент теплопередачи от газа в окружающую среду, Вт/м<sup>2</sup> К;  $C_p$  – средняя изобарная теплоемкость газа, кДж/кг К;  $D_i$  – среднее на участке значение коэффициента Джоуля-Томсона, К/МПа;  $q$  – пропускная способность газопровода, млн. м<sup>3</sup>/сут;  $\Delta$  – относительная плотность газа по воздуху;  $L$  – длина участка газопровода, км.

Средняя температура газа на участке газопровода  $T_{cp}$ :

$$T_{cp} = T_0 + \frac{T_n - T_0}{aL} (1 - e^{-aL}) - D_i \frac{P_n^2 - P_k^2}{2aL P_{cp}} \left( 1 - \frac{1}{aL} (1 - e^{-aL}) \right). \quad (5)$$

Средняя изобарная теплоемкость природного газа  $C_p$  определяется по формуле:

$$C_p = R(E_0 + E_1 P_{np} + E_2 P_{np}^2 + E_3 P_{np}^3), \quad (6)$$

$$\text{где } E_0 = 4,437 - 1,015T_{np} + 0,591T_{np}^2, \quad (7)$$

$$E_1 = 3,29 - \frac{11,37}{T_{np}} + \frac{10,9}{T_{np}^2}, \quad (8)$$

$$E_2 = 3,23 - \frac{16,27}{T_{np}} + \frac{25,48}{T_{np}^2} - \frac{11,81}{T_{np}^3}, \quad (9)$$

$$E_3 = -0,214 + \frac{0,908}{T_{np}} - \frac{0,967}{T_{np}^2}, \quad (10)$$

удельная газовая постоянная:

$$R = \frac{8,3143}{M}, \quad (11)$$

молярная масса газовой смеси:

$$M = \sum_{i=1}^n x_i M_i, \quad (12)$$

значения приведенного давления и температуры:

$$P_{пр} = \frac{P}{P_{пк}}, \quad (13)$$

$$T_{пр} = \frac{T}{T_{пк}}, \quad (14)$$

псевдокритические значения давления и температуры:

$$P_{пк} = \sum_{i=1}^n x_i P_{кpi}, \quad (15)$$

$$T_{пк} = \sum_{i=1}^n x_i T_{кpi}. \quad (16)$$

Среднее значение коэффициента Джоуля-Томсона  $D_i$  для природных газов определяется как:

$$D_i = H_0 + H_1 P_{пр} + H_2 P_{пр}^2 + H_3 P_{пр}^3, \quad (17)$$

где

$$H_0 = 24,96 - 20,3T_{пр} + 4,57T_{пр}^2, \quad (18)$$

$$H_1 = 5,66 - \frac{19,92}{T_{пр}} + \frac{16,89}{T_{пр}^2}, \quad (19)$$

$$H_2 = -4,11 + \frac{14,68}{T_{пр}} - \frac{13,39}{T_{пр}^2}, \quad (20)$$

$$H_3 = 0,568 - \frac{2,0}{T_{пр}} + \frac{1,79}{T_{пр}^2}. \quad (21)$$

Температура газа после сжатия (на выходе из ГПА):

$$T_{2н} = T_{1н} \cdot \varepsilon_n^{m_\tau} \approx T_{1н} \cdot \varepsilon_n^{\frac{0,235}{\eta_n}}. \quad (22)$$

### Результаты эксперимента

Для анализа влияния температуры на выходе компрессорного цеха на энергоэффективность участка ГТС проведем моделирование и расчет участка магистрального газопровода DN 1400 с расположенными на нем тремя линейными одноцеховыми компрессорными станциями (рис. 3). Примем для расчета следующие технологические параметры транспорта газа: объем транспорта газа - 90 млн. м<sup>3</sup>/сут., максимальное рабочее давление магистрального газопровода - 7,4 МПа. Компримирующие мощности компрессорных цехов КС-1, КС-2, КС-3: 4 газотурбинных агрегата ГПА-16 (при схеме работы 3х1+1 в режиме проектной производительности). Термобарические параметры на входе КС-1: давление  $P_{1н} = 5,4$  МПа, температура газа на входе компрессорного цеха  $T_{1н} = 293$  К. Диапазон изменения температуры на выходе АВО КС-1: от 318 К до 273 К. Давление нагнетания на всех трех цехах примем равным

максимальному рабочему давлению в газопроводе.

Давление в конце каждого линейного участка равно входному давлению на следующей КС, выходное давление КС - начальное давление следующего участка МГ. Потерями давления во входной и выходной обвязке компрессорной станции пренебрежем вследствие их небольшой величины по сравнению с потерями по длине  $L=100$  км участка МГ между КС. Нижний предел понижения температуры в АВО газа на КС-1 будет ограничиваться по условию безгидратного режима течения газа, а верхний предел охлаждения газа АВО ограничивается температурой 318 К безаварийного режима работы КС.

В качестве критериев энергоэффективности примем значения потребляемой мощности компрессорного цеха и годовой расход топливного газа (ТГ).

Значения потребляемой мощности для трех компрессорных цехов во всем диапазоне параметров были рассчитаны с учетом характеристик ЦБН, а также расчетно-оценочным методом согласно алгоритмам, приведенным в [6], [7].

Расход топливного газа ГТУ, тыс. м<sup>3</sup>/ч определяется согласно [6]:

$$q_{ТГ} = q_{ТГ}^0 \left( 0,75 \cdot \frac{N_n}{N_e^0} + 0,25 \cdot K_{Pa} \sqrt{\frac{T_a}{288}} \right) \cdot K_{ТГ} \cdot K_{\bar{n}}, \quad (23)$$

где  $q_{ТГ}^0 = \frac{3,6 \cdot 10^3 \cdot N_e^0}{\eta_e \cdot Q_{Тс}}$  - номинальный расход топливного газа, тыс. м<sup>3</sup>/ч;  $K_{ТГ}$  - коэффициент технического состояния ГТУ (по топливу);  $N_n$  - мощность, потребляемая ЦБН, МВт;  $\eta_e$  - номинальный КПД ГТУ;  $Q_{Тс}$  - теплота сгорания топливного газа, кДж/м<sup>3</sup>.

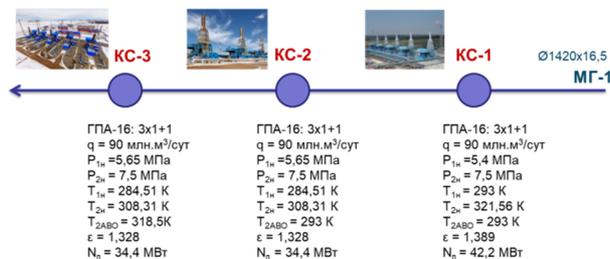


Рис. 3. Расчетная схема участка ГТС с тремя линейными КС

Результаты расчета потребляемой мощности КС-2, КС-3 и годового расхода ТГ в зависимости от выходного температурного

режима КС-1, представленные на рис. 4, 5, показывают повышение энергоэффективности следующих за КС-1 станций КС-2 и КС-3 с понижением температуры газа на выходе АВО КС-1. Потребляемая мощность компрессорных станций и годовое потребление топливного газа на КС-2, КС-3 снижается за счет снижения потерь по участку газопровода и, как следствие, более высокого давления на входе компрессорных цехов КС-2, КС-3, а также снижения необходимой степени сжатия для обеспечения технологического режима МГ. Общее (по трем цехам) потребление топливного газа и суммарная потребляемая мощность, являющиеся показателями системной энергоэффективности участка ГТС, также снижаются при снижении температуры газа на выходе с АВО головной станции.

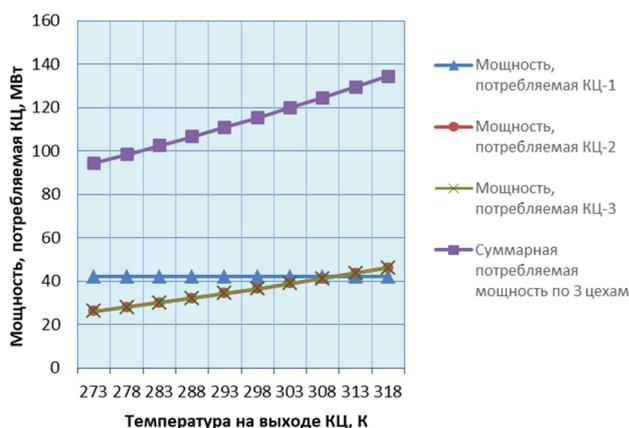


Рис. 4. Зависимость потребляемой мощности компрессорных цехов КЦ-1, КЦ-2, КЦ-3 от выходного давления КЦ-1

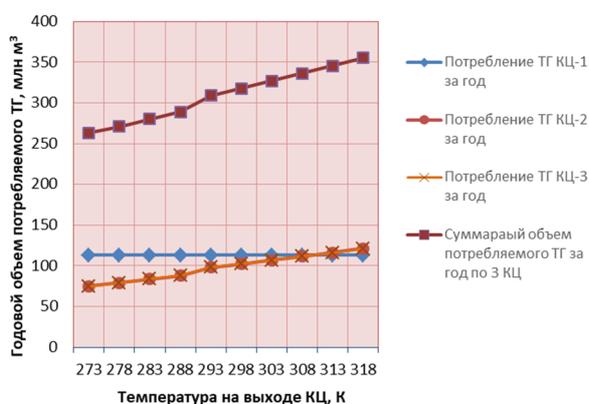


Рис. 5. Зависимость годового потребления топливного газа компрессорных цехов КЦ-1, КЦ-2, КЦ-3 от выходного давления КЦ-1

## Выводы

Результаты исследования влияния температурного режима на выходе АВО КС на энергоэффективность ГТС позволяют сделать следующие выводы.

1. Значение потребляемой мощности и объемов потребляемого газа головной рассматриваемой станции остаются постоянными при изменении температурного режима работы КС (рис. 4, 5), что говорит о том, что температурный режим КС не влияет на ее локальную энергоэффективность.

2. Температурный режим головной станции влияет на энергоэффективность последующих станций и энергоэффективность участка ГТС в целом. Снижение температуры газа на выходе компрессорной станции позволяет снизить энергозатраты последующих станций (рис. 4, 5) за счет уменьшения потерь давления на участке газопровода между КС и снижения энергозатрат на сжатие из-за более низкой температуры газа на входе ГПА. Так, снижение температуры на выходе АВО головной КС до 308 К позволяет снизить общее годовое потребление топливного газа на участке ГТС на 5,4 %, снизить общую потребляемую мощность по цехам на 7,3 %. Снижение температуры на выходе АВО головной КС до 288 ÷ 298 К позволяет снизить общее годовое потребление топливного газа на участке ГТС на 10,5 ÷ 18,7 %, снизить общую потребляемую мощность по цехам на 14,2 ÷ 20,7 %.

## Литература

1. Козаченко А.Н. Эксплуатация компрессорных станций магистральных газопроводов. М.: Нефть и газ, 1999. 463 с.
2. Булыгина Л.В., Ряжских В.И. Анализ функционирования компрессорной станции по критерию энергоэффективности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 5. С. 25-37.
3. СТО Газпром 2-3.5-113-2007. Методика оценки энергоэффективности газотранспортных объектов и систем. М.: ВНИИГАЗ, 2007. 118 с.
4. Система автоматизированного управления аппаратами воздушного охлаждения сырого природного газа / С.В. Щербинин, Г.Ю. Коловертнов, А.Н. Краснов,

А.Ю. Новоженин // Сетевое издание «Нефтегазовое дело», раздел «Автоматизация». 2004. № 2.

5. Идентификация неизмеряемых параметров газопровода для моделирования параметров потока газа / К.А. Казак, А.М. Чионов, С.А. Коршунов, В.С. Кулик, А.С. Казак // Трубопроводный транспорт: теория и практика. М.: Всесоюзный научно-исследовательский

институт по строительству, эксплуатации трубопроводов и объектов ТЭК. 2012. № 2. С. 36-41.

6. СТО Газпром 2-3.5-051-2006. Нормы технологического проектирования магистральных газопроводов. М.: ВНИИГаз, 2006. 187 с.

7. Р Газпром 2-3.5-281-2008. Рекомендации по выбору основного технологического оборудования для транспорта газа. М.: ВНИИГаз, 2009. 73 с.

Поступила 28.02.2018; принята к публикации 29.03.2018

#### Информация об авторах

**Булгыгина Лидия Викторовна** - ведущий инженер, Дочернее открытое акционерное общество «Газпроектинжиниринг» (394007, Россия, г. Воронеж, Ленинский проспект, 119), тел. 8(908)130-83-86, e-mail: lidaspitsina@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8325-7693>

**Рязских Виктор Иванович** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: ryazhskih\_vi@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2834-3000>

## INFLUENCE OF THE TEMPERATURE REGIME OF THE COMPRESSOR STATION ON THE ENERGY EFFICIENCY OF WORK OF THE GAS TRANSPORT SYSTEM SITE

L.V. Bulygina<sup>1</sup>, V.I. Ryazhskikh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>DOAO «Gazproektengineering», Voronezh, Russian  
<sup>2</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian

**Abstract:** the problem of increasing the energy efficiency of compressor stations (CS) is considered. The influence of the temperature regime at the outlet of the compressor station on the energy efficiency of the gas transmission system (GTS) section was investigated. The analysis of the change in the thermal regime at the section of the GTS consisting of consecutive linear sections of the main gas pipeline (MG) and compressor stations is performed. An experiment was conducted to assess the effect of temperature on the output of the compressor station on the local and system energy efficiency of the compressor station. The GTS site with three linear compressor stations and gas-turbine gas-pumping units GPU-16 (with the scheme of operation 3x1 + 1) was chosen as an object of research. Thermohydraulic calculation, modeling and analysis of the operation modes of the gas transportation system with three linear compressor stations were carried out according to energy efficiency criteria. As criteria for energy efficiency, the annual consumption of fuel gas (FG) for the section of the GTS and the power consumption of the compressor stations were adopted. The technical aspects of the use and the possibility of controlling the temperature at the outlet of the compressor station due to the use of air coolers (AC) of gas are considered. The application of the results of the study of the temperature regime at the outlet of the compressor station will allow increasing the energy efficiency of the GTS section, reducing the power consumption of compressor stations and reducing the cost of fuel gas

**Key words:** compressor station, energy efficiency, gas compressor unit, air-cooling apparatus for gas

#### References

1. Kozachenko A.N. "Operation of compressor stations of main gas pipelines" ("Jekspluatacija kompressornyh stancij magistral'nyh gazoprovodov"), Moscow, Neft' i gaz, 1999, 463 p.
2. Bulygina L.V., Ryazhskikh V.I. "Analysis of the functioning of the compressor station by energy efficiency criteria", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no 5, pp. 25-37.
3. СТО Газпром 2-3.5-113-2007. "Methodology for assessing the energy efficiency of gas transmission facilities and systems" ("Metodika ocenki jenergojeffektivnosti gazotransportnyh objektov i system"), Moscow, VNIIGAZ, 2007, 118 p.
4. Shcherbinin S.V., Kolovertnov G.Yu., Krasnov A.N., Novozhenin A.Yu. "Automated control system for air-cooled natural gas cooling units" ("Sistema avtomatizirovannogo upravleniya apparatami vozdušnogo ohlazhdeniya syrogo prirodno go gaza"), *setevoe izdanie "Neftegazovoe delo", section "Automation"*, 2004, no 2.
5. Kazak K.A., Chionov A.M., Korshunov S.A., Kulik V.S., Kazak A.S. "Identification of non-measurable gas pipeline parameters for modeling gas flow parameters", *Tрубопроводный транспорт: теория и практика*, Moscow, Vsesoyuznyj nauchno-issledovatel'skij institut po stroitel'stvu, ehkspluatácii truboprovodov i objektov TEHK, 2012, no 2, pp. 36-41.

6. STO Gazprom 2-3.5-051-2006. “Norms of technological design of main pipelines” (“Normy tehnologicheskogo proektirovaniya magistral'nyh gazoprovodov”), Moscow, VNIIGAZ, 2006, 187 p.

7. R Gazprom 2-3.5-281-2008. “Recommendations regarding the selection of the main technological equipment for the transport of gas” (“Rekomendacii po vyboru osnovnogo tehnologicheskogo oborudovanija dlja transporta gaza”), Moscow, VNIIGAZ, 2009, 73 p.

Submitted 28.02.2018; revised 29.03.2018

**Information about authors**

**Lidiya V. Bulygina**, Engineer, DOAO «Gazproektengineering» (119 Leninsky prospect, Voronezh, 394007, Russia), ph. 8(908)1308386, e-mail: [lidaspitsina@yandex.ru](mailto:lidaspitsina@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8325-7693>

**Viktor I. Ryazhskikh**, Dr.Sc (Technical), Professor, Voronezh State Technical University, (14 Moskovsky prospect, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: [ryazhskih\\_vi@mail.ru](mailto:ryazhskih_vi@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2834-3000>

УДК 621.3.049.77

**АРХИТЕКТУРА КАНАЛЬНОГО КОДИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ПЛИС ДЛЯ 5G  
БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОУРОВНЕВОГО  
СИНТЕЗА**

© 2018 М.В. Хорошайлова

**Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** в данной статье предложены стратегии для достижения высокопроизводительной архитектуры ПЛИС для квазициклических кодов четности с низкой плотностью (QC-LDPC), основанных на построении идентичной матрицы circulant-1. Разбирая операцию обработки узлов в алгоритме аппроксимации минимальной суммы (min-sum), достигаем конвейерной обработки в последовательности многоуровневого декодирования без использования дополнительных аппаратных ресурсов. Компиляция высокого уровня синтеза используется для проектирования и разработки архитектуры на аппаратной платформе ПЛИС. Для проверки этой архитектуры на Xilinx Kintex-7 FPGA реализован декодер 608 Мбит / с, совместимый с IEEE 802.11n, с использованием компилятора LabVIEW FPGA в LabVIEW Communication System Design Suite. Масштабируемость архитектуры была использована для создания декодера 2,48 Гбит / с на одном ПЛИС Xilinx Kintex-7. Кроме того, представлено быстрое прототипированное экспериментирование гибридной системы автоматического повторного запроса, совместимое с IEEE 802.16, на основе разработанной эффективной архитектуры декодера. Несмотря на смешанный характер обработки данных - обработка цифрового сигнала и машины конечного состояния - компилятор LabVIEWFPGA значительно сократил время, чтобы исследовать пространство системных параметров и оптимизировать его с точки зрения производительности ошибок и использования ресурсов. Достигнуто 4-кратное повышение пропускной способности системы по сравнению с реализацией на основе центрального процессора (ЦП), чтобы измерить эффективность ошибок в системе над большими реалистичными наборами данных, используя ускоренное имитационное моделирование при отношении  $E_b / N_0 = 5,5$  дБ. Кроме того, достигается значительное сокращение аппаратного обеспечения

**Ключевые слова:** квазициклический LDPC-декодер, пропускная способность, алгоритм min-sum, архитектура декодера, ПЛИС

**Введение**

Канальное кодирование имеет решающее значение для достижения хорошей производительности в системе связи. Коды с низкой пропускной способностью, такие как турбокоды [1, 2] и низкоплотностные коды (LDPC) [3], как правило, требуют кодирование с высокой степенью сложности. Сегодня усилия по стандартизации к реализации 5G сотовых систем уже начались [4]. Обсуждается пригодность конкретной схемы кодирования канала, и для системной реализации размера 5G естественно ожидается эволюция требований, относящихся к каналному кодированию. В наших усилиях по изучению и разработке канальных кодов перейти от теоретической оценки эффективности реализации выделим два основных требования к процессу разработки. Первый - гибкость для будущих модификаций. Чтобы облегчить это, выбираем реконфигурируемую платформу ПЛИС. Более того, для этой эволюционирующей архитектуры стремимся

наблюдать не только теоретическую сложность и компромисс производительности, но также сложность реализации. Это подводит ко второму основному требованию, которое представляет собой быстрое прототипирование разрабатываемых методов в реальном мире. На рис. 1 приведена методология исследования. Стремясь разработать аппаратную архитектуру для канального кодирования, крайне важно контролировать производительность системы в режиме реального времени, на самом современном оборудовании. Это помогает нам отслеживать такие параметры, как пропускную способность, латентность и использование ресурсов системы при каждом изменении. Также хотелось бы подчеркнуть, что быстрое прототипирование можно использовать не только для проверки модели на реальных аппаратных, но и для ускорения теоретического моделирования.

Для этого в дополнение к использованию реализации на основе ПЛИС используется компилятор высокого уровня синтеза (High-

Level Synthesis, HLS), созданный в LabVIEW, а именно компилятор LabVIEW FPGA. Одним из основных вкладов в эту работу является современная технология HLS, которая предлагает автоматизированный и систематический поток компиляции, который генерирует оптимизированную аппаратную реализацию из пользовательских алгоритмов и требований к проектированию. Эта методология позволяет экспертам домена с минимальными знаниями об оборудовании использовать технологии ПЛИС при исследовании, прототипировании и проверке их сложных приложений, специфичных для домена. Как показано на рис. 2, поток компиляции принимает диаграмму приложения, а также требования к высокоуровневой модели, такие как тактовая частота и пропуск-

ная способность, и создает оптимизированную реализацию с оценками ресурсов и времени. Просто изменяя параметры приложения и требования к модели, разработчики могут быстро получить новые аппаратные реализации с обновленными оценками. Запросы и оценки на высоком уровне (пользовательские) позволяют разработчикам легко оценивать текущую модель и требования и планировать дальнейшие алгоритмические исследования. Этот быстрый процесс разработки открывает путь для экспертов в данной области, чтобы успешно выполнить оптимизированное дизайнерское решение со значительной экономией времени и затрат.



Рис. 1. Представление методологии исследования для проектирования и разработки архитектуры канального кодирования



Рис. 2. Представление потока компиляции высокоуровневого синтеза (HLS)

Коды QC-LDPC или их варианты могут быть декодированы (субоптимально) с использованием алгоритма распространения доверия (Belief Propagation, BP), являются весьма вероятными кандидатами для систем 5G [5]. Доступны работы по высокопроизводительным (порядка Гбайт / с) декодерам QC-LDPC на

основе BP; однако большинство таких работ сосредоточено на разработке интегральной схемы (ASIC), характерной для конкретной прикладной программы, которая обычно требует сложных настроек на уровне передачи регистров (RTL) и экспертных знаний по очень крупномасштабной интеграции (VLSI) модели.

Значительное подмножество вышеупомянутых работ относится к полностью параллельным архитектурам. С точки зрения развивающегося исследовательского решения, это не является привлекательным вариантом для быстрого прототипирования. В относительно менее изученной области реализации на основе ПЛИС впечатляющие результаты были недавно представлены и основаны на полностью параллельных архитектурах, которые не обладают гибкостью (специфичны для кода) и ограничены небольшими размерами блоков (в основном из-за запрещающей перегруженности). Здесь представлен высокопроизводительный на основе FPGA IEEE 802.11n стандартный совместимый QC-LDPC-канальный декодер. С архитектурной стратегией расщепления обработки узлов достигаем указанной степени конвейерной обработки без использования дополнительных аппаратных ресурсов. Система не только включает в себя обработку цифрового сигнала (DSP), но и конечного автомата (FSM). Несмотря на такой смешанный характер обработки данных, LabVIEWFPGA Compiler смог значительно сократить время, затрачиваемое на изучение общего пространства системных параметров, и оптимизировать использование ресурсов для достижения необходимой производительности.

### HLS с компилятором LabVIEW ПЛИС

Компилятор HLS в LabVIEW CSDS, а именно LabVIEW FPGA Compiler, направлен на определение возможностей для эффективного распараллеливания в алгоритмическом описании приложения с учетом требований, установленных пользователем. Здесь кратко опишем основные методы, встроенные в набор инструментов Compiler LabVIEW FPGA, которые позволяют эффективно переносить высокопроизводительный перевод алгоритма в описание VHDL.

*Анализ зависимостей памяти.* Развертка Loop на платформах FPGA - это известная оптимизация компилятора, используемая для использования параллелизма. Однако при наличии зависимостей выполнения между итерациями цикла разворот цикла может не способствовать повышению пропускной способности. Пример показан на рис. 3 (а), где зависимость выполнения ограничивает распараллеливание развернутых циклов. Хотя циклы были развернуты в два раза, как показано на рис.

3 (б), первая копия цикла ожидает завершения выполнения второй копии цикла. Из-за выполнения последовательного цикла общая производительность такая же, как и исходный цикл, однако за счет большего количества ресурсов FPGA, используемых новыми копиями цикла.

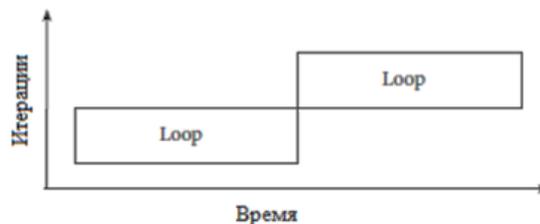
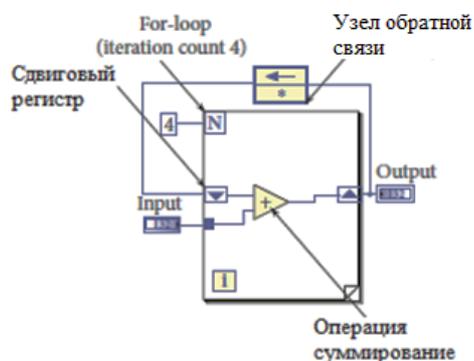
Однако если разворачивание выполняется только тогда, когда оно улучшает пропускную способность, компромисс между пропускной способностью и ресурсом потребления может быть достигнут в ходе реализации. Пример представлен на рис. 4, где узел обратной связи определяет зависимость данных от последовательных схемных исполнений. Зависимость между чтением и записью (read after write, RAW), между текущей операцией чтения памяти  $R_i$  и предыдущей операцией записи в память  $W_{i-1}$  показана на рис. 4 (а). Эта зависимость не позволяет компилятору конвейерно выполнять схемы и становится узким местом, ограничивая общую пропускную способность, как показано на рис. 4 (б). Однако если компилятор может определить, что  $R_i$  никогда не считывает местоположение памяти, которое обновляется с помощью  $W_{i-1}$ , то выполнение  $i$ -й диаграммы может перекрываться с выполнением  $(i - 1)$ -й и достигать большей пропускной способности, как показано на рис. 4 (в). Такой анализ также применим для ослабления зависимостей WAR и WAW. Показанная временная диаграмма на рис. 4а) представляет собой типичную схему виртуального инструмента графического программирования LabVIEW (VI), а на рис. 4б) и 4в) - соответствующие временные диаграммы.

Анализ шаблона доступа к памяти в LabVIEW FPGA Compiler в основном состоит из двух этапов. На первом этапе периодический шаблон доступа определяется путем мониторинга всех узлов состояния, которые вносят вклад в каждый шаблон доступа к памяти. На втором этапе сравниваются элементы модели доступа к памяти, и попарно вычисляется худший случай расстояния к между итерациями. Это зависимое расстояние итерации используется для создания зависимости затухания, что позволяет конвейерно выполнять доступ без ущерба для памяти.

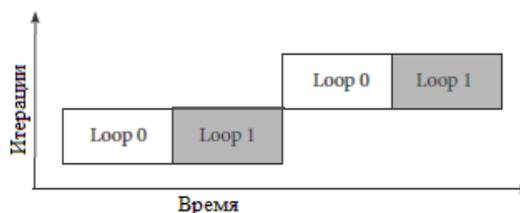
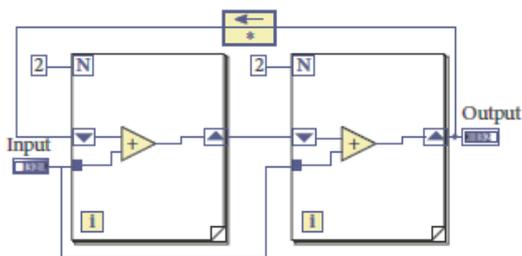
*Разделение памяти.* Блоки памяти на современных FPGA обычно имеют только два порта, один из которых обычно доступен только для чтения. Реализация памяти с большим количеством портов может стать очень ресурсоемкой и может значительно снизить такто-

вую частоту разработки. Ограниченное количество портов памяти часто приводит к получению доступа к сериализации. Эти последовательные запросы доступа к памяти часто делают вычислительные ядра бездействующими, что приводит к сокращению пропускной способности системы. Разделение памяти - это разделение исходного блока памяти на несколько меньших блоков памяти. Это секционирование эффективно увеличивает порты доступа к физической памяти FPGA, чтобы обеспечить одновременную работу чтения и записи в памяти, что сводит к минимуму время простоя вычислительных ядер. Элементы памяти

сгруппированы в наборы, так что гарантированно, что аксессуары в пределах одного набора имеют неперекрывающееся адресное пространство с членами другого набора, позволяя компилятору безопасно разбивать единую память на память для каждого набора устройств доступа. Размер каждого раздела - это размер адресного пространства для этого набора [6, 7]. Исходная память делится на небольшие разделы, основанные на диапазонах адресов min-max групп доступа к памяти, и каждая группа сопоставляется с отдельным разделом, имеющим согласованный диапазон адресов.

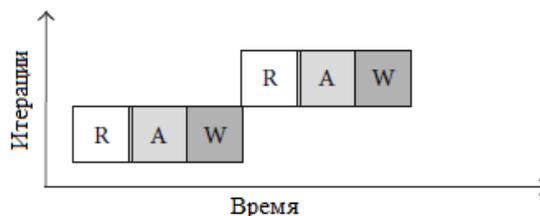
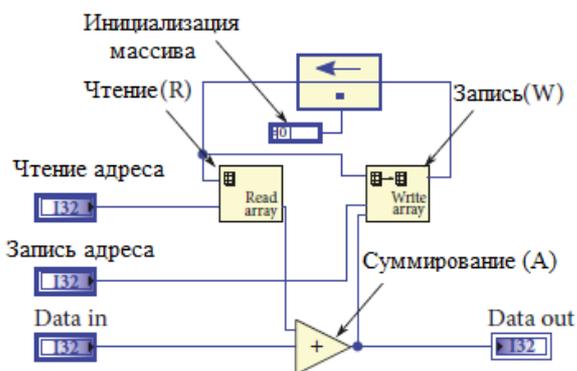


а) Временная диаграмма перед разворачиванием



б) Временная диаграмма после разворачивания

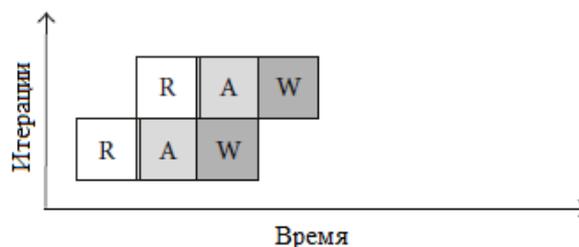
Рис. 3. Неэффективная развертка цикла. Слева представлены репрезентативные схемы виртуальных инструментов графического программирования LabVIEW (VI), а справа - соответствующие временные диаграммы



а) Описание алгоритма (диаграмма приложения)

б) Без анализа шаблонов доступа

Рис. 4. Повышение пропускной способности с использованием анализа шаблонов доступа



в) При анализе эталонов доступа

Рис. 4. Повышение пропускной способности с использованием анализа шаблонов доступа (продолжение)

Компилятор *LabVIEW FPGA* статически анализирует шаблоны доступа к памяти на данной диаграмме приложения и автоматически ослабляет узкое место доступа к памяти, не влияя на выполнение входного алгоритмического описания высокого уровня. Таким образом, трафик памяти уменьшается линейно по числу секционирования без дополнительной стоимости пространства памяти.

*Примеры использования.* Методы повышения пропускной способности реализуются на аппаратных средствах с использованием компилятора HLS. Реализация разделена на три тематических исследования, а именно на эффективно конвейерный IEEE 802.11n стандартный совместимый QC-LDPC-декодер, расширение этого декодера, обеспечивающее пропускную способность 2,48 Гбит / с, и систему экспериментов HARQ, основанную на IEEE 802.16 стандартный код QC-LDPC.

*Соответствующий LDPC-декодер IEEE 802.11n.* Чтобы оценить предлагаемые стратегии достижения высокой пропускной способности, был реализован декодер с масштабированным MSA для кода QC-LDPC в IEEE 802.11n (2012). Для этого кода  $m_b \times n_b = 12 \times 24$ ,  $z = 27, 54$  и  $81$ , что приводит к длине кода  $n = 24 \times z = 648, 1296$  и  $1944$  бит соответственно. Данная реализация поддерживает размер подматрицы  $z = 81$  и, следовательно, способна поддерживать все длины блоков для кода скорости  $R = 1/2$ .

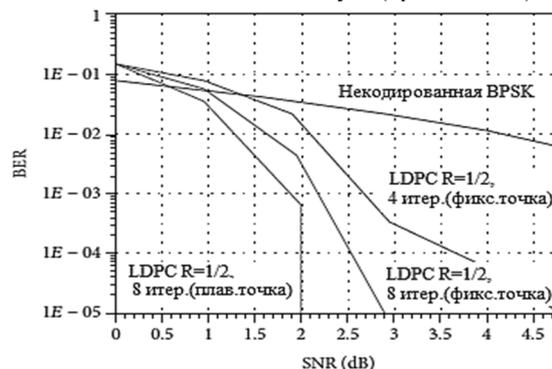


Рис. 5. Сравнение производительности BER

Представляем входные LLR из канала и сообщения CTV и VTC с 6 подписанными битами и 4 дробными битами. На рис. 5 показана производительность (BER) для представления данных с плавающей точкой (FP) и фиксированной точкой (FxP) с 8 итерациями декодирования. Как и ожидалось, реализация с фиксированной точкой страдает примерно на 0,5 дБ по сравнению с версией с плавающей точкой при  $BER = 10^{-4}$ , а разрыв увеличивается для более низких значений BER. Алгоритм декодера был описан с использованием программного обеспечения *LabVIEW CSDS*. Компилятор *LabVIEW FPGA* затем использовался для генерации кода языка описания аппаратной части (VHDL) с очень высокой скоростью (VHSIC) из описания графического потока данных. Код VHDL был синтезирован, размещен и маршрутизирован с использованием компилятора *Xilinx Vivado* на FPGA *Xilinx Kintex-7*, доступного на плате FPGA NI PXIe-7975R. Декодер достигает общей пропускной способности 608 Мбит / с при рабочей частоте 200 МГц и латентности 5,7 мкс при декодировании 4 итераций с показателями BER, показанных на рис. 5. В таблице показано, что использование ресурсов для версии 2 (почти в два раза быстрее из-за конвейерной обработки) близко к использованию версии 1. Компилятор *LabVIEWFPGA* выберет для использования

флип-флоп (FF) для хранения данных в 1-кратной версии, в то время как он использует больше блоков RAM (BRAM) в версии 2х.

Использование ресурсов IP блоков ПЛИС LDPC-декодером и пропускная способность после сопоставления с FPGA Xilinx Kintex-7

	1-ая версия	2-ая версия
Устройство	<i>Kintex-7k410t</i>	<i>Kintex-7k410t</i>
Пропускная способность (Мбит / с)	337	608
FF (%)	9.1	5.3
BRAM (%)	4.7	6.4
DSP48 (%)	5.2	5.2
LUT (%)	8.7	8.2

### Результаты

Система HARQ была реализована на FPGA Xilinx Kintex-7, и алгоритмическое описание было введено с использованием LabVIEWWCSDS. Были выбраны эти наборы инструментов, поскольку ПЛИС доступна в серии NI USRP 2943R, используемой для прототипирования исследований в реальном мире. Производительность системы оценивалась для набора IEEE 802.16 (2012) QC-LDPC кода. Из-за простоты модификации можем в коротких циклах развития заменить каналные коды другими исследуемыми структурами кода. Остаточная частота ошибок кадров (FER) учитывает ошибки, которые протоколом HARQ не удалось исправить, тогда как FER учитывает ошибки, которые происходят без использования протокола HARQ. Пропускная способность системы, определяемая как  $R / RTN$ , и пропускная способность, усредненная по кадрам в точке SNR, показаны на рис. 6.

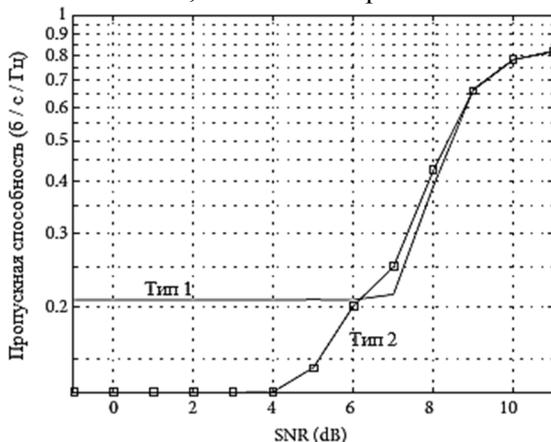


Рис. 6. Пропускная способность типа 1 и типа 2

### Заключение

Использовался компилятор HLS, который без знания экспертного уровня аппаратного домена позволяет надежно прототипировать наши исследования за короткий промежуток времени. С помощью таких методов, как оценка времени, конвейерная обработка, разворот цикла и вывод памяти из массивов, Compiler LabVIEW FPGA компилирует несвязанные алгоритмы потока данных, написанные с помощью циклов, массивов и обратной связи в описании VHDL, которые обеспечивают высокую тактовую частоту и высокую пропускную способность. Используемая технология HLS значительно сократила время, затрачиваемое на изучение пространства системных параметров, и оптимизировала его с точки зрения производительности ошибок и использования ресурсов. Предлагаемый метод - для достижения высокопроизводительной архитектуры ПЛИС для кода QC-LDPC. Стратегии проверяются путем внедрения стандартного совместимого декодера QC-LDPC на FPGA. Архитектура декодера масштабируется для достижения еще одной высокопараллельной реализации, которая имеет пропускную способность 2,48 Гбит / с. Процесс компиляции HLS используется для быстрого прототипа системы экспериментов HARQ с использованием кодов LDPC, которые не только содержат подсистемы бит-манипуляции, но и подсистемы, чувствительные к протоколу. Это облегчило измерение производительности ошибок в системе на больших реалистичных наборах данных на 4-кратной скорости, чем в обычных экспериментах на основе ЦП. Наконец, использование HLS и реконфигурируемых аппаратных платформ дает обещание реализовать архитектуру, подходящую для меняющихся требований к исследованиям беспроводной технологии 5G.

### Литература

1. Berrou C., Glavieux A., Thitimajshima P. Near Shannon limit error-correcting coding and encoding: turbo-codes// Proceedings of the IEEE International Conference on Communications. Geneve, Switzerland, May, 1993. pp. 1064–1070.
2. Башкиров А.В., Хорошайлова М.В. Использование вынужденной конвергенции для снижения сложности LDPC-декодирования // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 1. С. 69-73.
3. Gallager R. G. Low-Density Parity-Check Codes// IRE Transactions on Information Theory. 1962. vol. 8, no. 1, pp. 21–28.

4. Patent. U.S. 9 081 583. Compile time execution. H. Kee, T. Ly, N. Petersen, J. Washington, H. Yi, and D. Blasig. 2015.

5. Rapid and high-level constraint-driven prototyping using lab VIEW FPGA/H. Kee, S. Mhaske, D. Uliana et al.// in Proceedings of 2014 IEEE Global Conference on Signal and Information

6. Башкиров А.В., Коротков Л.Н., Хорошайлова М.В. Модель масштабируемого LDPC-декодера низкой

мощности с использованием алгоритмического синтеза высокого уровня // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 1. С. 65-69.

7. Башкиров А.В., Савинков А.Ю., Хорошайлова М.В. Реализация LDPC-декодера на массивно-параллельных вычислительных устройствах // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 6. С. 97-99.

Поступила 13.02.2018; принята 26.03.2018

#### Информация об авторах

**Хорошайлова Марина Владимировна** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pmv2205@mail.ru, тел. 8-910-732-66-13, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9167-9538>

## ARCHITECTURE OF FPGA BASED CHANNEL CODING FOR 5G WIRELESS NETWORK USING HIGH-LEVEL SYNTHESIS

M.V. Horoshaylova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** this article proposes strategies for achieving a high-performance architecture of FPGA for quasi-circular low-density parity codes (QC-LDPC) based on the construction of an identical circulant-1 matrix. By analyzing the operation of processing nodes in the minimum sum (min-sum) approximation algorithm, we achieve pipelining in a multi-level decoding sequence without using additional hardware resources. Compilation of a high level of synthesis is used to design and develop an architecture on a hardware FPGA platform. To test this architecture on the Xilinx Kintex-7 FPGA, a 608 Mbit/s decoder compatible with IEEE 802.11n is implemented, using the LabVIEW FPGA compiler in the LabVIEW Communication System Design Suite. Scalability of the architecture was used to create a 2.48Gbps decoder on a single Xilinx Kintex-7 FPGA. In addition, a quick prototyped experimentation of a hybrid automatic repeat request system, compatible with IEEE 802.16 is presented based on the developed effective decoder architecture. Despite the mixed nature of data processing - digital signal processing and end-state machines - the LabVIEWFPGA compiler significantly reduced the time to examine the space of system parameters and optimize in terms of error performance and resource utilization. A 4-fold increase in system throughput has been achieved compared to a CPU-based implementation to measure the efficiency of system errors over large, realistic data sets using accelerated simulation for  $E_b / N_0 = 5.5$  dB. In addition, a significant reduction in hardware is achieved

**Key words:** quasi-cyclic LDPC decoder, bandwidth, min-sum algorithm, decoder architecture, FPGA

#### References

1. Berrou C., Glavieux A., Thitimajshima P. "Near Shannon limit error-correcting coding and encoding: turbo-codes," *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*, Geneva, Switzerland, 1993, pp. 1064–1070.
2. Bashkirov A.V. "Using forced convergence to reduce the complexity of LDPC decoding", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 69-73.
3. Gallager R.G. "Low-Density Parity-Check Codes," *IRE Transactions on Information Theory*, 1962, vol. 8, no. 1, pp. 21–28.
4. Kee H., Ly T., Petersen N., Washington J., Yi H., Blasig D. "Compile time execution," *U.S. Patent 9 081 583*, 2015.
5. Kee H., Mhaske S., Uliana D. et al. "Rapid and high-level constraint-driven prototyping using lab VIEW FPGA," *Proceedings of 2014 IEEE Global Conference on Signal and Information*
6. Bashkirov A.V. "The model of a scalable low-power LDPC decoder using high-level algorithmic synthesis", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)* 2016, vol. 12, no. 1, pp. 65-69.
7. Bashkirov A.V. "Implementation of LDPC decoder on massively parallel computing devices", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 6, pp. 97-99.

Submitted 13.02.2018; revised 26.03.2018

#### Information about the author

**Marina V. Horoshaylova**, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: pmv2205@mail.ru, tel. 8-910-732-66-13, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9167-9538>

## ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫЕ ДВУХПОЛОСНЫЕ РУПОРНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

© 2018 А.С. Бадаев, А.С. Ковшарь

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** представлена методика расчёта рупорного акустического оформления. Показано, что максимально эффективным с точки зрения уровня характеристической чувствительности и КПД является экспоненциальный рупор. Для согласования входного сопротивления низкочастотного (НЧ) рупора с механическим сопротивлением головки громкоговорителя (ГГ) использован своеобразный понижающий акустический трансформатор, представляющий собой объем воздуха между горлом рупора и диффузором ГГ (предрупорная камера). Коэффициент трансформации такой камеры  $n$  равен отношению эффективной площади диффузора ГГ и площади горла рупора, при этом входное сопротивление рупора, приведенное к диффузору и, соответственно, излучаемая акустическая мощность увеличиваются в  $n^2$  раз. На основе предложенной методики разработаны высококачественные рупорные акустические системы (АС). Приведены их параметры и характеристики. Конструкция представляет собой два отдельных блока НЧ и средне-высокочастотный (СЧ-ВЧ). НЧ-блок является узкогорлым экспоненциальным сложенным рупором с предрупорной камерой, предполагающий установку устьем назад на определенном расстоянии от стены или угла помещения. В этом случае стены, угол и корпус АС являются продолжением рупора. СЧ-ВЧ-секция представляет собой широкогорлый экспоненциальный симметричный рупор цилиндрической волны. Передняя и задняя стороны ГГ нагружены на рупор и излучают "вперед – назад", формируя диаграмму направленности в виде восьмерки, что очень благоприятно при многоканальном воспроизведении. СЧ-ВЧ-блок свободно установлен на НЧ-блоке, его положение выбирается экспериментально, независимо от установки НЧ-блока. Анализ результатов измерений показывает высокую стабильность модуля полного сопротивления и приемлемую неравномерность АЧХ во всем диапазоне воспроизводимых частот. Отмечены высокий уровень звукового давления и хорошее качество звучания разработанных АС

**Ключевые слова:** акустические системы, рупорные акустические системы, головки громкоговорителей, КПД, уровень звукового давления

### Введение

Основным недостатком головок громкоговорителей (ГГ), установленных в классических акустических оформлениях, является невысокая излучаемая акустическая мощность и очень низкий КПД, что обусловлено низким значением сопротивления излучения  $R_{изл}$  ГГ, особенно на низких частотах, и несогласованностью механического сопротивления подвижной системы ГГ и окружающей среды.  $R_{изл}$  - это акустическое сопротивление, в общем случае, комплексное, которое оказывает воздушная среда колеблющейся диафрагме (диффузору) ГГ. При увеличении площади излучателя  $R_{изл}$  возрастает, но одновременно растет и его масса, что приводит к снижению КПД [1]. Решением проблемы является применение рупорного акустического оформления – рупорного громкоговорителя (РГ). РГ представляет собой устройство, в котором ГГ нагружена на вход рупора. Рупором называют трубу с постепенно возрастающим сечением. Входное отверстие рупора с меньшей

площадью называют «горлом», выходное, с большей площадью, «устьем» (рис. 1).

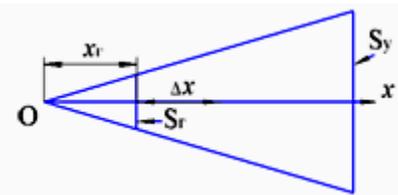


Рис. 1. Схема рупора:

O - вершина рупора;  $x$  - координата;  $r_г$  - расстояние от вершины до «горла»;  $S_г$  - площадь горла;  $S_у$  - площадь устья;  $\Delta x$  - единица приращения длины

Размеры «устья» должны быть сравнимы с длиной волны колебаний самых низких воспроизводимых частот, что обеспечивает высокое, преимущественно активное  $R_{изл}$  и отсутствие отражения звуковой волны от выходного отверстия. При этом рупор эффективно излучает звуковую энергию в окружающую среду. Небольшая площадь «горла» выбирается из расчета получения высокого активного входного сопротивления рупора, его согласования с механическим сопротивлением ГГ и обеспечения как можно

более низкого уровня нелинейных искажений звукового сигнала. РГ является эффективным акустическим трансформатором, преобразующим низкое  $R_{изл}$  ГГ в высокое  $R_{изл}$  «устья» рупора. Таким образом, ГГ, установленная на входе рупора, может быть сравнительно небольшой, и следовательно, с легкой подвижной системой, а излучатель РГ-«устья» сколько угодно большим. КПД РГ достигает 30%, тогда как КПД традиционных АС (закрытый ящик, фазоинвертор и т.д.) не превышает 1-2 % [2].

### Методика расчета

При разработке РГ ставится задача получения максимально высокой излучаемой акустической мощности и высокого КПД в заданном диапазоне частот при низких нелинейных искажениях. Для этого необходимо определиться с выбором ГГ, рассчитать параметры «горла» и «устья» рупора, его длину и профиль – закон изменения площади поперечного сечения в зависимости от координаты  $x$  вдоль оси рупора  $S(x)$ . Зависимость  $S(x)$  определяет закон убывания амплитуды колебаний звуковой волны в рупоре, форму излучаемой волны, а следовательно,  $R_{изл}$  и акустическую мощность.

На сегодняшний день не существует единого подхода к выбору формы рупора, применяют конструкции с различным законом изменения поперечного сечения: экспоненциальные, конические, рупоры с трактрисой и т.д. Для описания волновых процессов и определения характеристик звукового поля в рупоре (линейных: звукового давления, колебательной скорости частиц среды, акустического сопротивления; энергетических: акустической мощности, интенсивности или силы звука и т.д.) следует рассмотреть решения волновых уравнений для рупоров различных конфигураций. Строгое решение трехмерного волнового уравнения связано со значительными трудностями. Поэтому будем рассматривать уравнения средних значений, вводя некоторые упрощающие допущения. Во-первых, будем предполагать, что звуковое давление незначительно меняется вдоль поперечного сечения рупора (т.е. от стенок до оси); форму звуковой волны, распространяющейся в рупоре, будем считать неизменной; предположим, что площадь «устья» настолько

велика, что отражением волны можно пренебречь, что характерно для бесконечного рупора; и, наконец, будем рассматривать одномерный случай, так называемое волновое уравнение Вебстера, которое имеет вид [3]

$$\frac{\partial^2 p(x)}{\partial x^2} + \frac{1}{S(x)} \cdot \frac{\partial S(x)}{\partial x} \cdot \frac{\partial p(x)}{\partial x} + k^2 p(x) = 0, \quad (1)$$

где  $p = p(x)e^{j\omega t}$  - переменное звуковое давление вдоль оси рупора;  $S(x)$  - площадь поперечного сечения вдоль оси рупора;  $k = \omega/c$  - волновое число;  $\omega$  - круговая частота звуковых колебаний;  $c$  - скорость звука в воздухе.

Рассмотрим три наиболее распространенных профиля рупоров: экспоненциальный, конический и параболический.

*Экспоненциальный рупор* обеспечивает пропорциональное увеличение площади сечения рупора  $S(x)$  со скоростью возрастания сечения  $dS/dx$ :

$$\frac{dS(x)}{dx} = \beta S(x), \quad (2)$$

где  $\beta$  - коэффициент расширения рупора, определяющий относительное изменение площади сечения при изменении осевой длины на единицу.

В экспоненциальном рупоре площадь сечения увеличивается по экспоненте

$$S(x) = S_\Gamma e^{\beta x}, \quad (3)$$

где  $S_\Gamma$  - площадь «горла» при  $x = 0$ ;  $x$  - координата, отсчитываемая от «горла».

В этом случае уравнение (1) принимает вид

$$\frac{d^2 p(x)}{dx^2} + \beta \frac{dp(x)}{dx} + k^2 p(x) = 0, \quad (4)$$

Решением уравнения (4) будет [3]:

$$p(x) = A_1 e^{-\frac{\beta x}{2}} \cdot \exp j\left(-kx \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{4k^2}}\right) + A_2 e^{\frac{\beta x}{2}} \cdot \exp j\left(kx \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{4k^2}}\right), \quad (5)$$

где  $A_1$  - амплитуда звукового давления прямой волны;  $A_2$  - амплитуда отраженной волны.

После умножения на  $\exp j\omega t$  решение принимает вид

$$p(x, t) = A_1 e^{-\frac{\beta x}{2}} \cdot \exp j(\omega t - kx \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{4k^2}}) + A_2 e^{\frac{\beta x}{2}} \cdot \exp j(\omega t + kx \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{4k^2}}) \quad (6)$$

Поскольку мы допускали отсутствие отражения от «устья» рупора (случай бесконечного рупора), выражение (6) можно представить в виде:

$$p(x, t) = A_1 e^{-\frac{\beta x}{2}} \cdot \exp j(\omega t - kx \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{4k^2}}) \quad (7)$$

Среднее значение  $\bar{p}$  и колебательной скорости  $\bar{q}$  будут [1]:

$$\bar{p} = \rho \frac{dp}{dt} = j\omega \rho A_1 e^{-\frac{\beta x}{2}} \cdot \exp j(\omega t - kx \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{4k^2}}) \quad (8)$$

где  $\rho$  - плотность воздуха.

$$\bar{q} = -\frac{dp}{dx} = \frac{\beta}{2} + jk \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{4k^2}} A_1 e^{-\frac{\beta x}{2}} \cdot \exp j(\omega t - kx \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{4k^2}}) \quad (9)$$

Входное сопротивление рупора, которое является нагрузкой для  $R_{ИЗЛ}$  ГГ:

$$\dot{Z}_{ВХ} = \frac{\bar{p}(0)}{\bar{q}(0)} S_{\Gamma} = \rho c S_{\Gamma} \frac{jk}{\frac{\beta}{2} + jk \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{4k^2}}} \quad (10)$$

Разделив действительную и мнимую часть, получим

$$\dot{Z}_{ВХ} = \rho c S_{\Gamma} (\sqrt{1 - \frac{\beta^2}{4k^2}} + j \frac{\beta}{2k}) = R_{ВХ} + jX_{ВХ} \quad (11)$$

При  $\frac{\beta^2}{4k^2} = 1$ ,  $\beta^2 = \frac{4\omega_{КР}^2}{c^2}$ ,  $\beta = \frac{2\omega_{КР}}{c}$ ,

$$\omega_{КР} = \frac{\beta c}{2}, \quad f_{КР} = \frac{\beta c}{4\pi} \quad (12)$$

$\dot{Z}_{ВХ}$  носит чисто реактивный характер и рупор не излучает. Частота  $f_{КР}$  называется критической частотой, она определяет нижнюю границу полосы частот, пропускаемых рупором  $f_{ГР}$ .

С учетом (12) выражение (11) приобретает вид

$$\dot{Z}_{ВХ} = \rho c S_{\Gamma} (\sqrt{1 - (\frac{f_{КР}}{f})^2} + j \frac{f_{КР}}{f}) \quad (13)$$

Волновые процессы в экспоненциальном рупоре возможны только на частотах выше  $f_{КР}$ . С ростом частоты  $R_{ВХ}$  быстро растет и через 4 октавы достигает максимального значения  $R_{ВХ} = \rho c S_{\Gamma}$ , равного чисто активному сопротивлению для плоской волны, реактивное сопротивление  $X_{ВХ}$  при этом стремится к 0 (рис.2). Поэтому  $p$  и  $q$  в плоской волне совпадают по фазе, их амплитуды не меняются с расстоянием от излучателя, форма и площадь фронта также не меняется, следовательно, энергия, приходящаяся на единицу площади фронта, неизменна на любом расстоянии.

Конический рупор раскрывается по закону

$$S(x) = S_{\Gamma} (\frac{x}{x_{\Gamma}})^2 \quad (14)$$

где  $S_{\Gamma}$  - площадь «горла»;  $x$  - отсчитываемая от вершины с  $x = 0$ ;  $x_{\Gamma}$  - расстояние от вершины до «горла»;  $S(x)$  - площадь поперечного сечения рупора в координате  $x$ .

$$S(x) = S_{\Gamma} (1 + \frac{\Delta x}{x_{\Gamma}})^2, \quad \text{коэффициент } \frac{1}{x_{\Gamma}^2}$$

характеризует скорость раскрыва конического рупора (рис.1).

Волновое уравнение (1) в этом случае имеет вид

$$\frac{\partial^2 p(x)}{\partial x^2} + \frac{2}{x} \cdot \frac{\partial p(x)}{\partial x} + k^2 p(x) = 0 \quad (15)$$

Решая уравнение (14), определяя  $\bar{p}$  и  $\bar{q}$  аналогично случаю экспоненциального рупора, получим

$$\dot{Z}_{\text{ВХ}} = \rho c S_{\Gamma} \left( \frac{k^2 x_{\Gamma}^2}{1 + k^2 x_{\Gamma}^2} + j \frac{k x_{\Gamma}^2}{1 + k^2 x_{\Gamma}^2} \right) = R_{\text{ВХ}} + j X_{\text{ВХ}} \quad (16)$$

что аналогично сопротивлению излучения для сферической волны [1]. В такой волне интенсивность или сила звука убывает с увеличением расстояния от излучателя по квадратичному закону. Частотная зависимость  $\dot{Z}_{\text{ВХ}}$  конического рупора приведена на рис. 2.

*Параболический рупор.* В этом случае зависимость  $S(x)$  имеет вид

$$S(x) = S_{\Gamma} \frac{x}{x_{\Gamma}} \quad (17)$$

$S(x) = S_{\Gamma} \left( 1 + \frac{\Delta x}{x_{\Gamma}} \right)$ ,  $\frac{1}{x_{\Gamma}}$  определяет скорость возрастания  $S$ .

Волновое уравнение для параболического рупора представляет собой уравнение Бесселя первого порядка

$$\frac{\partial^2 p(x)}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \cdot \frac{\partial p(x)}{\partial x} + k^2 p(x) = 0 \quad (18)$$

Решение этого уравнения дает

$$\dot{Z}_{\text{ВХ}} = j \rho c S_{\Gamma} \frac{H_0^{(2)}(kx_{\Gamma})}{H_1^{(2)}(kx_{\Gamma})} \quad (19)$$

где  $H_0^{(2)}(kx_{\Gamma})$  и  $H_1^{(2)}(kx_{\Gamma})$  функция Ханкеля второго рода нулевого и первого порядка

$$H_0^{(2)}(kx_{\Gamma}) = J_0(kx_{\Gamma}) - jY_0(kx_{\Gamma}) \quad (20)$$

$$H_1^{(2)}(kx_{\Gamma}) = J_1(kx_{\Gamma}) - jY_1(kx_{\Gamma}) \quad (21)$$

где  $J_n(kx_{\Gamma})$  - функция Бесселя первого рода порядка  $n$ ;  $Y_n(kx_{\Gamma})$  - функция Бесселя второго рода порядка  $n$ .

Подставляя (20) и (21) в (19) и разделяя действительную и мнимую части, получим

$$\dot{Z}_{\text{ВХ}} = \rho c S_{\Gamma} \left( \frac{2}{\pi k x_{\Gamma} [J_1^2(kx_{\Gamma}) + Y_1^2(kx_{\Gamma})]} + j \frac{J_0(kx_{\Gamma})J_1(kx_{\Gamma}) + Y_0(kx_{\Gamma})Y_1(kx_{\Gamma})}{J_1^2(kx_{\Gamma}) + Y_1^2(kx_{\Gamma})} \right) = R_{\text{ВХ}} + j X_{\text{ВХ}} \quad (22)$$

что является  $R_{\text{ИЗЛ}}$  для цилиндрической волны. Для этого типа волны интенсивность звука убывает обратно пропорционально расстоянию от источника излучения, а звуковое давление обратно пропорционально квадратному корню расстояния.

Используя табличные значения бесселевых функций, построим частотную зависимость  $R_{\text{ВХ}}$  параболического рупора, которая приведена на рис.2.

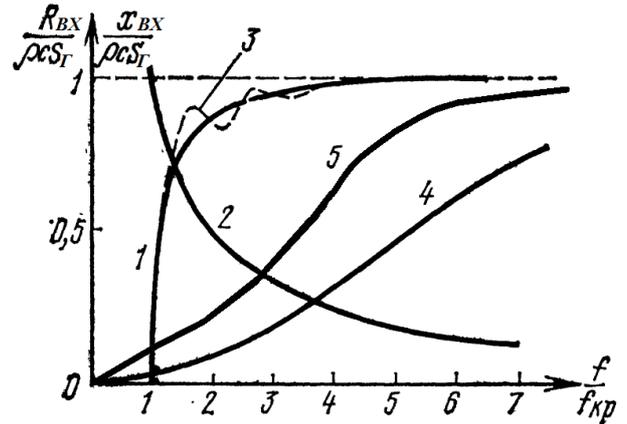


Рис. 2. Частотные зависимости активной и реактивной составляющих входного сопротивления различных рупоров: 1, 2 – активная и реактивная составляющие  $\dot{Z}_{\text{ВХ}}$  бесконечного экспоненциального рупора; 3 – активная составляющая  $\dot{Z}_{\text{ВХ}}$  конечного экспоненциального рупора; 4 – активная составляющая  $\dot{Z}_{\text{ВХ}}$  параболического рупора; 5 – активная составляющая  $\dot{Z}_{\text{ВХ}}$  конического рупора

Сравнительный анализ зависимостей, представленных на рис. 2, показывает, что в области высоких частот характеристики рупоров близки. Совсем иная картина наблюдается на низких частотах в области  $f_{\text{кр}}$  и ниже, где  $R_{\text{ВХ}}$  мало или равно нулю. Но в экспоненциальном рупоре, в отличие от остальных, выше  $f_{\text{кр}}$   $R_{\text{ВХ}}$  резко возрастает и в пределах 3–4 октав от  $f_{\text{кр}}$  достигает максимума, становится чисто активным, постоянным и равным сопротивлению излучения для плоской волны. Это обуславливает оптимальную, в случае согласования сопротивлений, нагрузку для ГГ, установленной на входе рупора. При выполнении вышеупомянутого условия о сравнимости периметра контура «устья» с длиной волны  $\lambda$ , соответствующей  $f_{\text{кр}}$ , т.е.

$$S_y = \frac{\lambda^2}{4\pi} = \frac{c^2}{4\pi f_{\text{кр}}^2} \quad (23)$$

«устье» экспоненциального рупора будет излучать плоскую волну, для которой  $R_{изл} = \rho c S_y$  – активно и максимально из всех типов звуковых волн. Таким образом, экспоненциальный рупор эффективно излучает акустическую энергию на низких частотах, это является его основным и главным преимуществом по сравнению с другими типами рупоров.

В реальных конечных рупорах наблюдается отражение звуковой волны от «устья», что приводит к возникновению в рупоре стоячих волн, вследствие чего частотная характеристика  $R_{вх}$  и АЧХ по звуковому давлению имеет волнообразный вид (кривая 3 на рис.2). Для выравнивания АЧХ следует покрывать стенки рупора, особенно вблизи «горла», звукопоглощающим материалом.

Анализ результатов работы [3] показывает, что уровень нелинейных искажений экспоненциального рупора незначительно уступает аналогичному параметру параболического, сравним с коническим и значительно ниже, чем у рупоров более высоких порядков расширения, например, гиперболических. Таким образом, при разработке конструкции высококачественных рупорных АС мы остановим свой выбор на экспоненциальном профиле.

Расчет рупора начинается с определения нижней граничной частоты воспроизведения  $f_{ГР}$ , равной  $f_{КР}$ . Эта частота выбирается равной частоте основного резонанса ГГ в воздухе  $f_0$ , которая приводится в паспорте ГГ или измеряется [4], или частоте резонанса ГГ, установленной в замкнутом объеме (компрессионной камере объемом  $V_{КК}$ )  $f_p$ , которая равна

$$f_p = f_0 \sqrt{\frac{V_{\text{Э}}}{V_{\text{КК}}} + 1}, \quad (24)$$

где  $V_{\text{Э}}$  – эквивалентный объем (параметр, характеризующий гибкость подвижной системы ГГ, который приводится в паспорте, а лучше – измеряется [4]).

Затем из формул (12) вычисляется коэффициент расширения рупора

$$\beta = \frac{4\pi f_{\text{КР}}}{c}. \quad (25)$$

Площадь «устья»  $S_y$  определяется по формуле (23), площадь «горла»  $S_{\Gamma}$  равна эффективной площади диффузора ГГ в широкогорлых РГ или площади выхода предрупорной камеры в случае узкогорлых РГ. Предрупорная камера представляет собой объем воздуха  $V_{\text{К}}$  между «горлом» рупора и диффузором ГГ и является своеобразным акустическим трансформатором для согласования входного сопротивления РГ и механического сопротивления ГГ [2]. Коэффициент трансформации такой камеры равен отношению эффективной площади диффузора  $S_{\text{д}}$  и площади горла  $S_{\Gamma}$ , т.е.  $n = S_{\text{д}} / S_{\Gamma}$ . При этом входное сопротивление РГ, приведенное к диффузору, увеличивается в  $n^2$  раз, соответственно в  $n^2$  раз увеличивается изучаемая акустическая мощность. Коэффициент акустической трансформации увеличивается при уменьшении площади горла рупора, но это допустимо в определенных пределах, так как приводит к увеличению нелинейных искажений. Обычно коэффициент акустической трансформации выбирают порядка 2-10 [1]. В работе [2] с использованием метода электромеханических аналогий было показано, что

$$V_{\text{К}} \approx \frac{V_{\text{ЭКК}}}{14}, \quad (26)$$

где  $V_{\text{ЭКК}}$  – эквивалентный объем ГГ, установленной в компрессионной камере,

$$V_{\text{ЭКК}} = \frac{V_{\text{КК}} V_{\text{Э}}}{V_{\text{КК}} + V_{\text{Э}}}. \quad (27)$$

Осевая длина рупора может быть определена из (3) при  $x = L$  по формуле

$$L = \frac{\ln S_y / S_{\Gamma}}{\beta}. \quad (28)$$

Длина рупора при низких значениях  $f_{ГР}$  и, соответственно,  $\beta$  может достигать нескольких метров, что составляет определенную проблему при размещении рупорных АС в жилых помещениях. Решением этой проблемы может являться применение «свернутых» рупоров, у которых часть, прилегающая к горлу, формируется с помощью перегородок подобно акустическому лабиринту [5].

### Излучатели, конструкция и характеристики разработанных АС

Для получения широкополосных рупорных систем с максимально линейной АЧХ следует выбирать излучатели с определенными значениями параметров Тилля - Смолла. Желательно, чтобы ГГ, установленная в низкочастотный рупор, обладала помимо легкой подвижной системы низкой резонансной частотой  $f_p$  и полной добротностью  $Q_p$ , высоким значением сопротивления и небольшой индуктивностью звуковой катушки, в то же время не очень большим  $V_s$ . Методика определения этих параметров приводится в [4]. Как видно, требования, предъявляемые к параметрам головок, весьма противоречивы, поэтому выбор излучателя представляет определенную проблему.

Мы остановили свой выбор на ГГ отечественного производства. Для низкочастотного (НЧ) звена были выбраны 2 ГГ 6ГД-2, для средне-высокочастотного СЧ-ВЧ звена – 1 ГГ – 8 ГДШ-1. ГГ 8 ГДШ-1 была доработана: вместо пылезащитного колпачка был вклеен ВЧ-рупорок, для расширения диапазона ВЧ, диффузор был пропитан раствором изобутилового каучука для выравнивания АЧХ.

НЧ-головка имеет следующие параметры: номинальная мощность – 6 Вт; паспортная мощность – 12 Вт; номинальное сопротивление – 8 Ом; эффективный рабочий диапазон частот – 40-5000 Гц; уровень характеристической чувствительности – 96 дБ; резонансная частота – 35 Гц; полная добротность – 0,5; эквивалентный объем – 220 дм<sup>3</sup>; диаметр – 25 см.

СЧ-ВЧ-головка: номинальная мощность – 4 Вт; паспортная мощность – 8 Вт; номинальное сопротивление – 4 Ом; резонансная частота – 55 Гц; эффективный рабочий диапазон частот – 63-20000 Гц; уровень характеристической чувствительности – 93 дБ; полная добротность – 0,9; диаметр – 20 см.

По формулам (23-28) была рассчитана и сконструирована полностью рупорная двухполосная АС, схема которой представлена на рис. 3. Конструкция представляет собой два отдельных блока НЧ и СЧ-ВЧ. НЧ-блок является узкогорлым экспоненциальным сложенным рупором с предрупорной камерой,

предполагающим установку устьем назад на определенном расстоянии от стены или угла помещения. В этом случае стены, угол и корпус АС являются продолжением рупора.

СЧ-ВЧ-секция представляет собой широкогорлый экспоненциальный симметричный рупор цилиндрической волны. Передняя и задняя сторона ГГ нагружена на рупор и излучает "вперед – назад", формируя диаграмму направленности в виде восьмерки, что очень благоприятно при многоканальном воспроизведении. СЧ-ВЧ-блок свободно установлен на НЧ-блоке, его положение выбирается экспериментально независимо от установки НЧ-блока.

Рассчитанные параметры НЧ-блока следующие:  $V_{кк} = 280 \text{ дм}^3$ ;  $f_{ГР} = f_p = 58 \text{ Гц}$ ;  $\beta = 2$ ;  $n = 4$ ;  $S_{Г} = 200 \text{ см}^2$ ;  $S_{у} = 2,8 \text{ м}^2$ ;  $L = 2,5 \text{ м}$ ;  $V_{к} = 14 \text{ дм}^3$ .

Параметры СЧ-ВЧ-блока:  $f_{ГР} = 260 \text{ Гц}$ ;  $\beta = 10$ ;  $S_{Г} = 400 \text{ см}^2$ ;  $S_{у} = 1500 \text{ см}^2$ ;  $L = 16 \text{ см}$ .

Поскольку РГ является своеобразным акустическим фильтром, возможно их подключение без электрических фильтров. В случае применения электрических разделительных фильтров электрическая схема АС имеет вид, представленный на рис. 4.

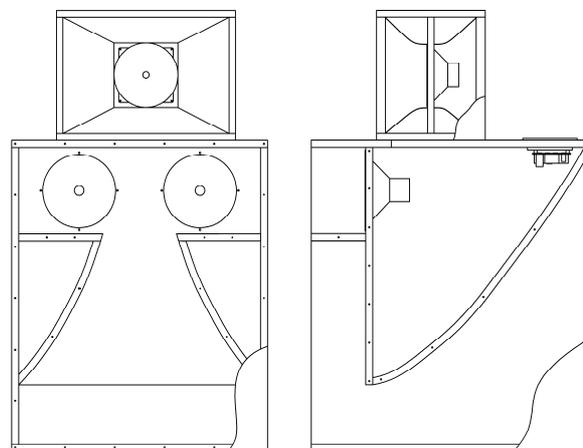


Рис. 3. Схема разработанных рупорных АС

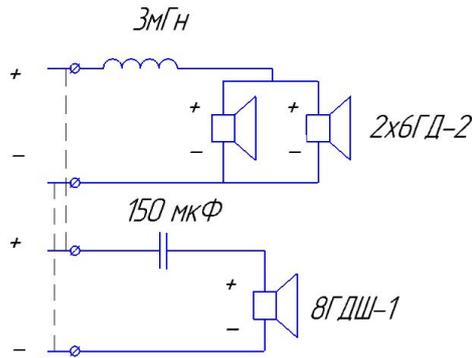


Рис. 4. Электрическая схема разделительных фильтров

Частота раздела – 250 Гц.

Возможна 3-х полосная версия разработанных рупорных АС. В этом случае коаксиально штатной ГГ 8ГДШ-1 устанавливается небольшая рупорная ВЧ ГГ, например, 6 ГДВ-1, подключаемая через простейший фильтр первого порядка.

Корпус АС выполнен из MDF-плиты толщиной 22 мм. Выбор материала обусловлен его прочностью, высоким декрементом затухания, легкостью и технологичностью обработки и отделки. Внутренние стенки НЧ-блока покрыты звукопоглощающим материалом, компрессионная камера полностью заполнена звукопоглотителем.

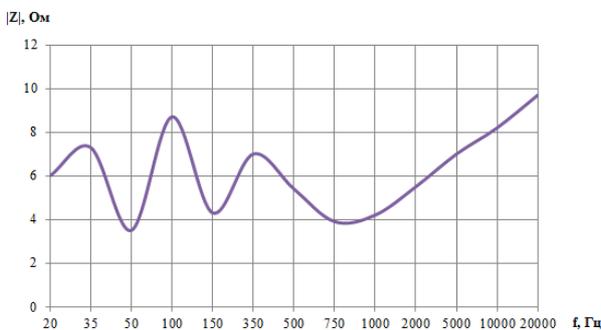


Рис. 5. Частотная зависимость модуля полного сопротивления

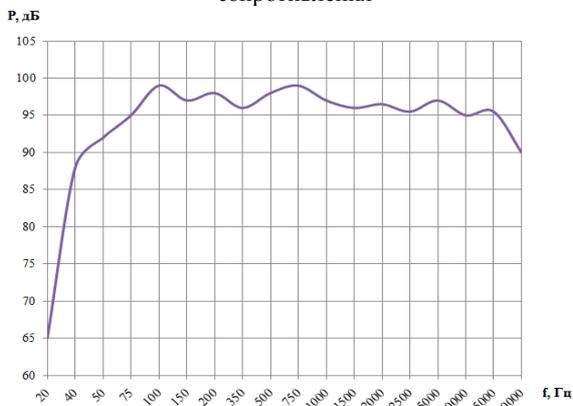


Рис. 6. АЧХ по звуковому давлению

Основные технические характеристики разработанных АС следующие: номинальная мощность - 16 Вт; паспортная мощность - 35 Вт; номинальное сопротивление - 4 Ом; диапазон воспроизводимых частот - 40 - 20000 Гц; уровень характеристической чувствительности - 98 дБ; габариты НЧ-секции 102×80×92 см; масса – 43 кг; габариты СЧ-ВЧ-секции: 38×54×35 см, масса – 9 кг. Частотная зависимость модуля полного сопротивления и АЧХ по звуковому давлению представлены на рис.5 и 6.

### Заключение

Анализ результатов измерений показывает правильность расчета и настройки рупора. Отмечена высокая стабильность модуля полного сопротивления, во всем диапазоне воспроизводимых частот он меняется от 3,8 до 9 Ом, что значительно упрощает подбор усилителя низкой частоты. АС успешно работали с транзисторными и ламповыми усилителями, в том числе с однотактными, работающими в классе А и обладающими невысокой выходной мощностью (5-6 Вт). АЧХ разработанных АС обладает неплохой равномерностью; можно отметить незначительный спад уровня звукового давления (-3 дБ) на частотах выше 500 Гц, где начинает работать широкополосная ГГ. Выбор излучателя с более высоким уровнем характеристической чувствительности (например, фирмы «Fostex») позволит выровнять АЧХ в этой частотной области. Тестовые прослушивания различных фонограмм, в том числе с широким динамическим диапазоном, показали хорошее качество звучания рупорных АС. Разработанные АС могут быть использованы в трактах высококачественного звуковоспроизведения, в многоканальных системах домашнего кинотеатра, в качестве профессиональных мониторов в студиях звукозаписи и радиовещания.

### Литература

1. Электроакустика и звуковое вещание: учеб. пособие для вузов / И.А. Алдошина, Э.И. Вологдин, А.П. Ефимов и др.; под ред. Ю.А. Ковалгина. М.: Горячая линия – Телеком, Радио и связь, 2007. 872с.
2. Бадаев А.С., Гукин Д.В. Высококачественная рупорная акустическая система // Проектирование радиоэлектронных и лазерных устройств и систем:

межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2011. С.70-88

3. Beranek L. L., Mellow T. J. *Acoustics: Sound Fields and Transducers*. Oxford GB: Acedemic Press, 2012. 678p.

4. Бытовая электроакустическая аппаратура. Справочник / И.А. Алдошина, В.Б. Бревдо, Г.Н. Веселов и др. М.: Кубик-а, 1996. 320с

5. Бадаев А.С. Акустическая трансмиссионная линия // Проектирование радиоэлектронных и лазерных устройств и систем: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2007. С. 139–145.

Поступила 11.09.2017; принята 26.03.2018

#### Информация об авторах

**Бадаев Андрей Станиславович** – кандидат физ.-мат. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8-952-553-86-63, e-mail: andrbad56@yandex.ru

**Ковшарь Александр Сергеевич** – магистр, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: all\_94@list.ru

## HIGH-QUALITY TWO-WAY HORN ACOUSTIC SYSTEMS

**A.S. Badaev, A.S. Kovshar'**

**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** the method of calculating horn acoustic design is presented. It is shown that an exponential horn is the most effective from the point of view of the level of characteristic sensitivity and efficiency. To match the input resistance of the low-frequency (LF) horn with the mechanical resistance of the loudspeaker head (LH), a kind of lowering acoustic transformer is used, which represents some amount of air between the neck of the horn and the diffuser of LH (pre-horn chamber). The transformation ratio of such a chamber  $n$  is equal to the ratio of the effective area of the diffuser of LH and the area of horn's neck, while the input resistance of the horn, reduced to the diffuser and, accordingly, the radiated acoustic power increases by a factor of  $n^2$ . Based on the proposed methodology, high-quality horn speaker systems (SS) are developed, their parameters and characteristics are presented. The design represents two separate blocks of LF and medium-high-frequency (MF-HF). The low-frequency block is a narrow-necked exponential folded horn with a pre-horn chamber, which assumes that the mouth is set back at a certain distance from the wall or the corner of the room. In this case, the walls, the angle and the body of the speaker are a continuation of the horn. The MF-HF section represents a wide-angle exponential symmetric horn of a cylindrical wave. The front and back sides of the LH are loaded on the horn and emit "forward-backward", forming an eight shape, which is very favorable for multi-channel playback. The midrange-high-frequency unit is freely installed on the low-frequency block, its position is chosen experimentally regardless of the setting of the low-frequency block. The analysis of the measurement results shows the high stability of the impedance module and the acceptable unevenness of the amplitude-frequency characteristic over the entire range of reproduced frequencies. The developed SS has a high level of sound pressure and good sound quality

**Key words:** acoustic systems, horn speaker systems, loudspeaker heads, efficiency, sound pressure level

#### References

1. Aldoshina I.A., Vologdin E.I., Efimov A.P. et al, ed. Kovalgin Yu.A. "Electroacoustics and sound broadcasting. Manual" ("Elektroakustika i zvukovoe veshchanie: ucheb. posobie dlya vuzov"), Moscow, Goryachaya liniya - Telecom, Radio i svyaz', 2007, 872 p.

2. Badaev A.S., Gukin D.V. "High-quality horn speaker system", *Designing of radio-electronic and laser devices and systems: interuniversity collected papers (Proyektirovaniye radioelektronnykh i lazernykh ustroystv i sistem: mezhvuz. sb. nauch. tr.)*, Voronezh, Voronezh State Technical University, 2011, pp. 70-88.

3. Beranek L.L., Mellow T.J. "Acoustics: Sound Fields and Transducers", Oxford GB, Acedemic Press, 2012, 678 p.

4. Aldoshina I.A., Brevdo V.B., Veselov G.N. et al. "Household electroacoustic equipment. Reference book" ("Bytovaya elektroakusticheskaya apparatura. Spravochnik"), Moscow, Kubik-a, 1996, 320 p.

5. Badaev A.S. "Acoustic transmission line", *Designing of radio-electronic and laser devices and systems: interuniversity collected papers (Proyektirovaniye radioelektronnykh i lazernykh ustroystv i sistem: mezhvuz. sb. nauch. tr.)*, Voronezh, Voronezh State Technical University, 2007, pp. 139-145.

Submitted 11.09.2017; revised 26.03.2018

#### Information about the authors

**Andrey S. Badaev**, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: faddey52@mail.ru

**Aleksandr S. Kovshar'**, MA, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: all\_94@list.ru

## ЛОКАЛИЗАЦИЯ И НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ СЛУЧАЙНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ПОВЫШЕНИИ РЕСУРСА РАБОТОСПОСОБНОСТИ АЦП И ЦАП

© 2018 В.С. Кононов<sup>1</sup>, С.И. Рембеза<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Специализированное конструкторско-технологическое бюро  
электронных систем», г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** в статье анализируются два метода оценки наработки до отказа аналого-цифровых (АЦП) и цифро-аналоговых (ЦАП) преобразователей: аналитический метод и метод тестовых структур. Отмечается, что первый метод был разработан для оценки наработки до отказа микросхем малой и средней степени интеграции и то, что его адаптация к современным наноразмерным элементам и технологиям не обеспечивает приемлемую достоверность. Показано, что второй метод, основанный на использовании предельных характеристик активных элементов и технологических слоев, позволяет гипотетически достоверно прогнозировать наработку до отказа АЦП и ЦАП, не содержащих случайных дефектов. Предложены способы локализации и нейтрализации случайных дефектов, основанные на использовании конструктивных решений при проектировании АЦП и ЦАП, и специального технологического контроля при изготовлении пластин. Показано, что их использование повышает достоверность испытаний на безотказность микросхем при максимально-допустимой рабочей температуре

**Ключевые слова:** АЦП, ЦАП, испытания, наработка, отказ

### Введение

Обеспечение высокого ресурса работоспособности электронной компонентной базы (ЭКБ) и, в частности, АЦП и ЦАП является важнейшей проблемой, значимость которой возрастает по мере увеличения сроков активного функционирования специальной и космической аппаратуры. До настоящего времени не существует методов достоверной оценки наработки до отказа АЦП и ЦАП как на этапе разработки, так и в процессе испытаний, в том числе приемо-сдаточных испытаний в условиях серийного производства. Особую сложность представляет отбраковка таких микросхем, содержащих случайные дефекты, которые могут привести к отказу при эксплуатации.

### Методы прогнозирования наработки до отказа

#### Аналитический метод

Аналитический метод был разработан в 60-х годах 20-го века и успешно использовался при оценке наработки до отказа микросхем малой и средней степени интеграции [1]. Попытки распространить этот метод для оценки наработки до отказа АЦП и ЦАП и для отбраковки таких микросхем, содержащих случайные дефекты, оказались малоэффективными из-за параметрических ограничений при выборе ускоряющих факторов (температура, напряжение) для аналоговых блоков. Дело в том, что на

практике моделирование АЦП и ЦАП проводится обычно в диапазоне температур, лишь незначительно превышающем (по абсолютной величине) рабочий диапазон температур. Это связано с высокой чувствительностью аналоговых блоков к воздействию температуры и напряжения питания, что обычно приводит к параметрическим (обратимым) отказам блоков и в целом АЦП и ЦАП при выходе за пределы упомянутого температурного диапазона.

Согласно [1], наработка до отказа рассчитывается по формулам:

$$T_H = T_P \frac{\ln(1-\alpha_0)}{n_0 \ln 0,95}; \quad (1)$$

$$T_P = -5 \ln 0,95 / (\lambda_1 + \lambda_2); \quad (2)$$

$$\lambda_1 = \lambda_{кор}(T_0) \cdot K_{укор}(T) + \alpha_{кр} \cdot \lambda_{кр}(T_0) \cdot K_{укр}(T) + \sum_{i=1}^k n_i \cdot \alpha_{ТКCi} \cdot \lambda_{ТКCi}(T_0) \cdot K_{уТКCi}(T); \quad (3)$$

$$\lambda_2 = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{m_i} \beta_j \sum_{k=1}^{n_j} \lambda_{Элjk}(T_0) \cdot \alpha_j(T) + \sum_{i=1}^z \lambda_M(T_0) \cdot S_{Mi} \cdot \gamma_i[\alpha_i(T)] + \lambda_{пр}(T_0) \cdot K_{упр}(T); \quad (4)$$

$$K_y = \exp \frac{E_a}{K_0} \left( \frac{1}{T_{p0}+273} - \frac{1}{T_p+273} \right); \quad (5)$$

$$T_{p0} = T_0 + R_T \cdot P; \quad (6)$$

$$T_p = T + R_T \cdot P, \quad (7)$$

где  $T_H$  – наработка до отказа;  $T_P$  – гамма-процентный ресурс;  $\alpha_0$  – риск изготовителя;  $n_0$  – объем выборки;  $\lambda_1$  – интенсивность отказов конструктивных элементов (корпус, посадка кристалла в корпусе, термокомпрессионные соединения);  $\lambda_{кор}(T_0)$  и  $K_{укор}(T)$  – интенсивность отказов корпуса при номинальной (обычно комнатной) температуре окружающей среды  $T_0$  и коэффициент ускорения таких отказов при температуре  $T \neq T_0$ ;  $\alpha_{кр}$  – эмпирический коэф-

фициент, зависящий от площади кристалла;  $\lambda_{кр}(T_0)$  и  $K_{укр}(T)$  – интенсивность отказов соединения кристалла с корпусом и коэффициент ускорения таких отказов;  $k$  – количество типов термокомпрессионных соединений (ТКС);  $n_i$  – количество ТКС одного типа;  $\alpha_{ТКСi}$  – коэффициент, зависящий от площади ТКС;  $\lambda_{ТКСi}(T_0)$  и  $K_{уТКСi}(T)$  – интенсивность отказов ТКС  $i$ -го типа и коэффициент ускорения таких отказов;  $\lambda_2$  – интенсивность отказов элементов кристалла и их межсоединений;  $l$  – количество функциональных частей кристалла, построенных на основе транзисторов одного типа;  $m_i$  – количество групп элементов, находящихся в одинаковых электрических режимах в пределах каждой функциональной части кристалла;  $\beta_j$  – коэффициент качества;  $n_j$  – количество транзисторов в каждой из  $m_j$ -групп;  $\lambda_{элjk}(T_0)$  – интенсивность отказов транзисторов;  $\alpha_j(T)$  – коэффициент режима;  $\lambda_M(T_0)$  – интенсивность отказов металлизации единичной площади;  $z$  – число разнонагруженных участков металлизации;  $S_{mi}$  – площадь одинаково нагруженных (по току и температуре) участков металлизации;  $\gamma_i(\alpha_i)$  – коэффициент, учитывающий влияние электрического режима и температуры на надежность металлизации;  $\lambda_{пр}(T_0)$  и  $K_{упр}(T)$  – интенсивность отказов прочих элементов кристалла и коэффициент ускорения таких отказов;  $E_a$  – энергия активации;  $K_0=8,6 \cdot 10^{-5} \text{эВ/}^\circ\text{К}$  – постоянная Больцмана;  $R_T$  – тепловое сопротивление «кри-

сталл-корпус»;  $P$  – мощность рассеяния микросхемы.

Практическое применение формул (1-7) требует использования большого числа номограмм и эмпирических зависимостей, давно утративших соответствие практическим данным, особенно при переходе к наноразмерным элементам и технологиям. Это обстоятельство ограничивает применение аналитического метода, описанного в [1].

### Метод тестовых структур

Анализ многих зарубежных технологий и соответствующих им дизайн-китов показывает, что метод тестовых структур широко используется при проектировании микросхем с заданным уровнем наработки до отказа.

В основе этого метода лежит оценка наработки до отказа проектируемой микросхемы по предельным характеристикам активных элементов (МОП-транзисторы, резисторы, конденсаторы и т.д.) и технологических слоев в объеме кристалла (металлизация, контакты) и на его границах (ТКС, соединение типа «кристалл-корпус»), которые определяются в процессе ускоренных испытаний специальных тестовых структур.

Типовой перечень тестовых структур приведен в таблице.

Типовой перечень тестовых структур

Тип тестовой структуры		Назначение
Длинные металлические шины	Прямолинейные	Оценка влияния тепловых эффектов и эффектов массопереноса на предельно-допустимую и предельную плотности тока
	С множеством изгибов	
	С множеством «слотов»	
Контактные цепочки (~ 100 контактов)	n <sup>+</sup> -ME1	Оценка влияния температуры и площади контакта на сопротивление и предельно-допустимые и предельные токи через контакты
	p <sup>+</sup> -ME1	
	ME1-ME2	
	---	
МОП-транзисторы	РМОП (М затворов)	Оценка крутизны, выходного сопротивления, пробивных напряжений и влияния горячих электронов на деградацию ВАХ
	НМОП (М затворов)	
	РМОП ( $W_{min}/L_{min}, W_{min}/2L_{min}, 2W_{min}/L_{min}$ ) НМОП ( $W_{min}/L_{min}, W_{min}/2L_{min}, 2W_{min}/L_{min}$ )	
Параллельное соединение конденсаторов типа «металл-окисел-металл» с одинаковыми размерами	Матрица NxN конденсаторов с размерами одного конденсатора 20x20 мкм <sup>2</sup>	Оценка удельной емкости, линейности и влияния напряжения и температуры на деградацию C-V-характеристик
	Матрица NxN конденсаторов с размерами одного конденсатора 100x100 мкм <sup>2</sup>	
Кольцевые генераторы	15 инверторов с $W_p / L_p = 10W_{pmin} / L_{pmin}$ , $W_n / L_n = 5W_{nmin} / L_{nmin}$	Оценка влияния напряжения и температуры на частоту и ее деградацию
	15 инверторов с $W_p / L_p = 20W_{pmin} / 2L_{pmin}$ , $W_n / L_n = 10W_{nmin} / 2L_{nmin}$	

В таблице использованы обозначения: слоты – отверстия в металлизации, обеспечивающие равномерное распределение тока в изогнутых шинах; ME1, ME2 – первая и вторая металлизация;  $W_{\min}$ ,  $L_{\min}$  – минимально-допустимые значения ширины и длины канала МОП-транзистора;  $W_p$ ,  $L_p$  и  $W_n$ ,  $L_n$  – размеры РМОП- и НМОП-транзисторов.

В этой таблице приведен далеко не полный перечень тестовых структур, используемых при создании новых технологий, особенно таких, которые ориентированы на производство АЦП и ЦАП. Не представлены, например, специальные тестовые структуры, которые необходимы для оценки воспроизводимости характеристик активных элементов (МОП-транзисторов, резисторов, конденсаторов и др.).

Здесь перечислены только те тестовые структуры, которые представляют интерес при получении данных для оценки наработки до отказа АЦП и ЦАП. С этой целью тестовые структуры включаются как показано на рис. 1 и выдерживаются в таком состоянии длительное время. При комнатной температуре это время

должно составлять не менее 15 лет, что соответствует минимально-допустимой норме по наработке до отказа. Однако такое время по практическим соображениям неприемлемо для выдержки тестовых структур во включенном состоянии.

Благодаря автономности тестовых структур, это время можно сократить до 1000-10000 часов, если температуру поднять до 175-200 °С. В данном случае, как показывает практика, обеспечивается получение необходимых данных для оценки наработки до отказа микросхем, предназначенных для работы при температурах до 85-125 °С.

Обычно имеет место равенство:

$$D(15 \text{ лет}; 125 \text{ }^\circ\text{C}) \cong D(5 \cdot 10^3 \text{ ч}; 175 \text{ }^\circ\text{C}), \quad (8)$$

где  $D$  – значение предельной электрической характеристики тестовой структуры.

Принято считать, что при температурах 175-200 °С в течение 1000-10000 часов не происходят аномальные изменения механизмов «старения» структуры микросхемы, но процесс «старения» экспоненциально ускоряется.

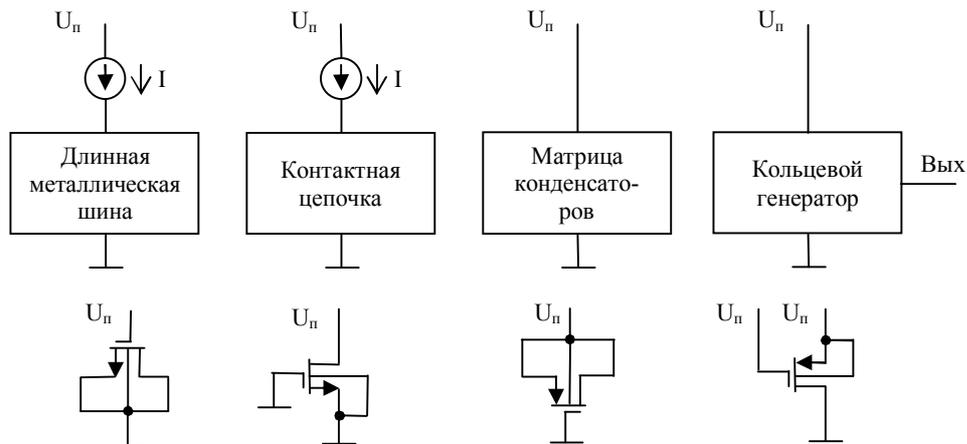


Рис. 1. Схемы включения тестовых структур:  $U_n$  – напряжение питания

При проведении ускоренных испытаний тестовых структур уточняются диффузионные профили и толщины подзатворных диэлектриков РМОП- и НМОП-транзисторов, размеры контактов, минимальная ширина металлических шин и т.д.

В итоге определяются предельно-допустимые и предельные электрические характеристики активных элементов и технологических слоев в структуре кристалла и на его границах в местах ТКС и посадки в корпус.

Для примера на рис. 2 показана усредненная зависимость предельных плотностей тока в металлических шинах (мА/мкм) и в контактах (мА/конт) с проектными нормами 180 нм от времени испытаний при 175 °С. Аналогичные

зависимости можно получить и для других проектных норм.

Однако наличие таких данных еще не означает, что их учет при проектировании АЦП и ЦАП будет гарантировать требуемую наработку до отказа. Строго говоря, такое возможно только при отсутствии случайных дефектов (дислокации, микротрещины в диэлектриках, инородные и диэлектрические включения в контактных областях, локальные заужения металлических и поликремниевых шин и т.д.), которые представляют серьезную угрозу надежному функционированию любой микросхемы, в том числе АЦП и ЦАП. Пока эта проблема купируется с помощью резервирования аппаратуры, что не всегда удобно на практике.

В то же время производственные возможности отбраковки АЦП и ЦАП, содержащих случайные дефекты, как уже говорилось выше, имеют параметрические ограничения, в результате чего применение существующих методов ускоренных испытаний становится неэффективным.

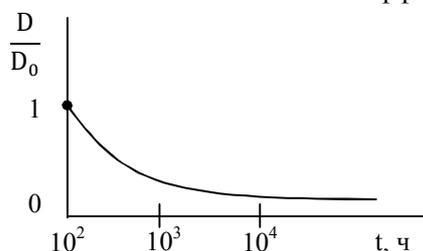


Рис. 2. Усредненная зависимость предельных значений типовых электрических характеристик от времени испытаний при 175 °C:  $D_0$  – значение характеристики после 100 часов испытаний

### Способы локализации и нейтрализации случайных дефектов

#### Термокомпрессионные соединения

При герметизации кристаллов наиболее часто используется ультразвуковое втирание алюминиевой проволоки в позолоченные траверзы корпуса и периферийные контактные площадки на кристалле. Качество образующихся контактов обычно контролируется по протеканию тока через диоды, которые в КМОП-технологии используются для защиты входов микросхем от воздействия электростатических зарядов. Если величина тока оказывается ниже определенного уровня, то это обстоятельство ассоциируется с наличием случайного дефекта, который в данном случае может быть устранен путем реставрирования сварного соединения.

#### Инородные и диэлектрические вкрапления в контактных областях

Размеры контактных областей внутри кристаллов современных микросхем достаточно малы и поэтому инородные и диэлектрические вкрапления могут оказывать существенное влияние на сопротивление контактов. Для нейтрализации влияния таких вкраплений можно использовать два подхода: конструкционный и технологический.

В первом случае при проектировании топологии в каждое межслойное соединение типа «металл-диффузия» или «металл-металл» добавляется по одному дополнительному контакту. В результате, если один контакт окажется дефектным, то второй контакт с большой вероятностью будет нормальным.

Во втором случае, когда, например, топология проектируется на основе библиотеки элементов с минимально-возможным количеством контактов в каждом межслойном соединении и добавление дополнительных контактов не представляется возможным, можно использовать процедуру сканирования поверхности кристаллов на пластине после вскрытия контактов и удаления остатков фоторезиста.

В процессе такого сканирования определяются координаты дефектных кристаллов и заносятся в базу данных для каждой пластины в технологической партии. При этом техника обнаружения дефектных кристаллов основывается на использовании алгоритмов распознавания образов, реализация которых в настоящее время не представляет особой сложности. Во всяком случае затраты на их использование вполне оправданы при создании специальной и космической техники.

#### Локальные заужения металлических и поликремниевых шин

Локальные заужения металлических и поликремниевых шин приводят к возрастанию плотности тока в местах заужения.

На этапе производственных испытаний такие заужения могут не привести к катастрофическим отказам. Однако в процессе эксплуатации будет прогрессировать термоэлектрическое «старение» дефектных шин и в конечном итоге может произойти их перегорание.

Для нейтрализации преждевременного «старения» желательно увеличить минимальную ширину шин, но это может привести к ухудшению частотных характеристик микросхем. В тех случаях, когда такой подход является неприемлемым, необходимо использовать технику сканирования, описанную в предыдущем разделе.

Иногда полезно использовать дублирование межсоединений в соседних слоях металлизации, что практически не увеличивает паразитную емкость межсоединений, но при этом гарантирует их качество. Например, ME1 шунтирует ME2, а ME2 – ME3 и т.д.

#### Дислокации и микротрещины

Дислокации и микротрещины относятся к дефектам активного типа, которые не «стоят» на месте, а перемещаются с течением времени под воздействием тензора механических напряжений. Основную опасность эти дефекты представляют для подзатворного окисла, рп-переходов и одиночных контактов всех типов.

К сожалению, дефекты подобного типа невозможно обнаружить при сканировании поверхности кристалла. Поэтому их поведение требует специального рассмотрения.

Принято считать, что двуокись кремния является для дислокаций непреодолимым барьером. В этом смысле КМОП-КНИ-структуры с примыканием сток/истоковых областей к скрытому и боковому диэлектрикам являются структурами, нечувствительными к дислокациям, находящимся за пределами этих диэлектриков.

В том случае, если дислокация случайным образом окажется в подканальной области МОП-транзистора, то с большой вероятностью она проявит себя в процессе производственных испытаний на воздействие термоударов и продолжительных вибрационных нагрузок.

В отличие от дислокаций, локализация микротрещин в диэлектриках и их нейтрализация являются более сложной проблемой. Возможным решением этой проблемы является создание на кристалле большого количества взаимно перекрывающихся защитных барьеров, которые будут предотвращать распространение микротрещин вдоль поверхности кристалла.

Определенный опыт в реализации такого подхода был получен при создании защитных улиткообразных барьеров на кристалле вокруг пережигаемых перемычек [2]. Наибольший эффект был достигнут при полном (до поверхности кремния) удалении диэлектрика, что усложняет трассировку межсоединений элементов и противоречит требованиям нормативных документов по сборке микросхем.

В связи с этим напрашивается более приемлемое решение, которое вытекает из осознания того факта, что микротрещины в диэлектрике представляют реальную опасность только для подзатворного окисла, а их влияние на контакты всех типов оказывается несущественным. Во всяком случае его можно нивелировать дублированием контактов, о чем уже говорилось ранее.

Для защиты подзатворного окисла МОП-транзисторов целесообразно использовать экраны на основе первой и второй металлизации. В данном случае требуемый эффект достигается тем, что механическая энергия микротрещины гасится вязкой металлизацией в удлиненных контактных областях, расположенных на путях возможного распространения микротрещин.

Для примера на рис. 3 показана топология NМОП-транзистора с КНИ-структурой, которая иллюстрирует оптимальное расположение

экранов и контактов после формирования первой (рис. 3, а) и второй (рис. 3, б) металлизации. На этом рисунке изображены удлиненные контакты типов ME1-n<sup>+</sup>/p<sup>+</sup>/poly (рис. 3, а) и ME2-ME1 (рис. 3, б).

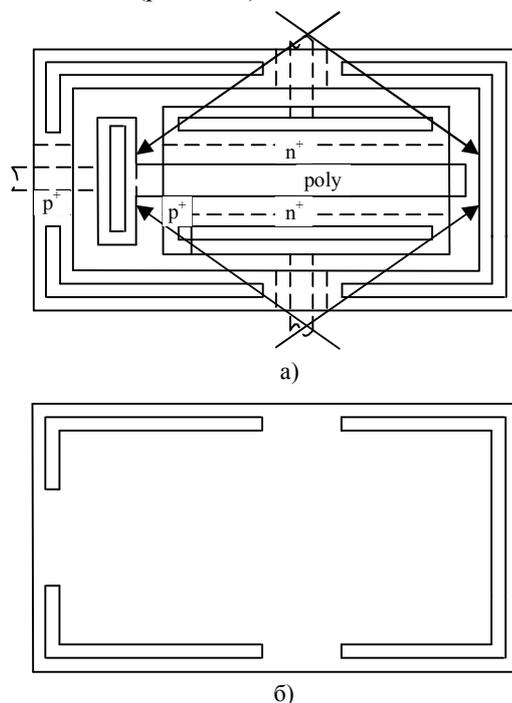


Рис. 3. Топология NМОП-транзистора с защитным экраном на основе первой (а) и второй (б) металлизации

Стрелками показаны направления возможного распространения микротрещин, проходящие наиболее близко к границам подзатворного окисла, но, тем не менее, на вполне безопасном расстоянии.

Выбор удлиненных контактов обусловлен необходимостью создания надежного препятствия для проникновения микротрещин между соседними контактами, имеющими в обычных коммерческих технологиях квадратную форму. Применение такой формы продиктовано требованиями к воспроизводимости размеров контактов при их травлении. При этом необходимое сопротивление конкретных межслойных соединений достигается за счет использования определенного количества таких контактов. Как показывает практика, использование удлиненных контактов с шириной равной ширине квадратного контакта не оказывает заметного влияния на воспроизводимость их размеров.

## Выводы

1. Аналитический метод оценки наработки до отказа, основанный на использовании сложных формул и большого числа номограмм и эмпирических зависимостей, фактически утра-

тивших соответствие практическим данным при переходе к наноразмерным элементам и технологиям, не обеспечивает достоверность такой оценки при разработке современных микросхем, в том числе АЦП и ЦАП.

2. Метод тестовых структур позволяет достоверно прогнозировать наработку до отказа АЦП и ЦАП, не содержащих случайных дефектов, по предельным характеристикам активных элементов (МОП-транзисторы, резисторы, конденсаторы и т.д.) и технологических слоев в объеме кристалла и на его границах в местах термокомпрессионных соединений и посадки в корпус. Эти характеристики определяются в процессе ускоренных испытаний специальных тестовых структур.

3. Существующие методы проведения ускоренных испытаний с целью отбраковки АЦП и ЦАП, содержащих случайные дефекты,

и подтверждения их наработки до отказа не отличаются приемлемой достоверностью из-за параметрических ограничений в работе микросхем при повышении температуры.

4. Предложенные способы локализации и нейтрализации случайных дефектов, основанные на использовании конструктивных решений и специального технологического контроля, повышают достоверность испытаний на безотказность АЦП и ЦАП при максимально-допустимой рабочей температуре.

#### Литература

1. PD 11 0755-90. Микросхемы интегральные. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность.

2. Кононов В.С., Боднар Д.М. Импортзамещение АЦП и ЦАП: ограничения и возможности // Компоненты и технологии. 2017. №8. С. 24-26.

Поступила 09.02.2018; принята 26.03.2018

#### Информация об авторах

**Кононов Владимир Сергеевич** – канд. техн. наук, инженер-конструктор, АО «Специализированное конструкторско-технологическое бюро электронных систем» (394063, Россия, г. Воронеж, Ленинский проспект, 160), e-mail: [casandra1983@mail.ru](mailto:casandra1983@mail.ru)

**Рембеза Станислав Иванович** – д-р физ.-мат. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8-473-243-76-95

### LOCALIZATION AND NEUTRALIZATION OF RANDOM DEFECTS DURING IMPROVING THE WORKING CAPACITY OF ADC AND DAC

V.S. Kononov<sup>1</sup>, S.I. Rembeza<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC SKTB ES, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** in this paper two methods for estimate of time between failures of analog-to-digital (ADC) and digital-to-analog (DAC) converters are analyzed: analytical method and method of test structures. It is noted, that the first method was developed for estimation of chips with small and medium scale integration, and its adaptation to current nano-sized elements and technologies does not provide acceptable reliability. It is shown, that the second method, based on usage of marginal characteristics of active elements and technological layers, allows to forecast time between failures of ADC and DAC without random defects. Techniques for localization and neutralization of random defects are offered, based on usage of construction methods during ADC and DAC design and special technological control during chip production. It is shown, that usage of this techniques increases reliability of trials for chips with maximum-allowed working temperature

**Key words:** ADC, DAC, tests, time to failure, failure

#### References

1. PD 11 0755-90, "Integrated circuits. Methods of accelerated testing for reliability and durability" ("Mikroskhemy integral'nye. Metody uskorennykh ispytaniy na bezotkaznost' i dolgovechnost'")

2. Kononov V.S., Bodnar' D.M. "Import substitution of ADC and DAC: limitations and possibilities", *Components & Technologies (Komponenty i tekhnologii)*, 2017, no. 8, pp. 24-26.

Submitted 09.02.2018; revised 26.03.2018

#### Information about the authors

**Vladimir S. Kononov**, Cand. Sc. (Technical), Engineer, JSC SKTB ES (160 Leninskiy prospekt, Voronezh 394063, Russia), e-mail: [casandra1983@mail.ru](mailto:casandra1983@mail.ru)

**Stanislav I. Rembeza**, Dr. Sc. (Physic and Mathematic), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. 8-473-243-76-95

## VERILOG-ОПИСАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ НА ПЛИС LDPC-ДЕКОДЕРА ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

© 2018 М.В. Хорошайлова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** в этой работе представлен проект ПЛИС и реализация параллельной архитектуры LDPC-декодера с низкой степенью сложности для приложений с высокой скоростью передачи данных. Описано создание регулярного кода низкой плотности и изучение его характеристик с точки зрения сложности, скорости передачи данных, задержки и BER по сравнению с отношением сигнал/шум (SNR) для различных итераций и количественных оценок. Выбранный код является обычным (3, 4) LDPC-кодом. Verilog-модель и синтез такой архитектуры используют декодирование по алгоритму распространения доверия (Believe propagation), упрощенного «Min-Sum». Изучена сложность предлагаемой архитектуры - это 6335 LE со скоростью передачи данных 2,12 Гбит/с для квантования 8 бит на второй итерации. Также представлена реализация платформы, основанная на совместном моделировании на Simulink, для проверки производительности в BER (Bit Error Rate) описанной архитектуры. Выполненные результаты моделирования показывают, что разработанная модель декодера имеет высокую скорость передачи данных, низкую задержку и очень низкую сложность. BER и SNR могут быть дополнительно улучшены за счет увеличения размера кода и сохранения того же принципа параллелизма

**Ключевые слова:** коды исправления ошибок, низкоплотные коды, алгоритм распространения доверия, язык Verilog, ПЛИС

### Введение

Коды LDPC были обнаружены Галлагером [1 – 3] в начале 1960 года. Это замечательное открытие в значительной степени игнорировалось исследователями почти 20 лет, вплоть до работы Таннера в 1981 году, в котором он представил новую интерпретацию LDPC кодов с графической точки зрения. Работа Таннера также была проигнорирована теоретиками примерно 14 лет до конца 1990-х годов, когда некоторые исследователи по кодированию начали изучать графические коды и итеративное декодирование. Их исследования привели к повторному открытию кодов Галлагера. Они показали, что длинный LDPC код с итеративным декодированием, основанный на алгоритме распространения доверия (Believe Propage), позволяет получить ошибку производительности, представляющую только часть децибела от предела Шеннона. Это открытие делает LDPC-коды мощными конкурентами относительно турбокодов для контроля ошибок, когда требуется высокая надежность. Коды LDPC имеют преимущество турбокодов – для достижения хорошей производительности ошибок не требуется длительное чередование. Таким образом, в 2004 году код LDPC был впервые стандартизован в спутниковой трансляции DVB-S2 [3].

### Принцип LDPC-кодов

Код LDPC может быть представлен его матрицей проверки на четность (отмечено H) или двудольным графом (граф Таннера). В примере на рис.1 строки матрицы представлены квадратами и называются проверочными узлами (check nodes), столбцы матрицы представлены кружками и называются переменными узлами (variable node), а «1» представляют собой ребра на графе.

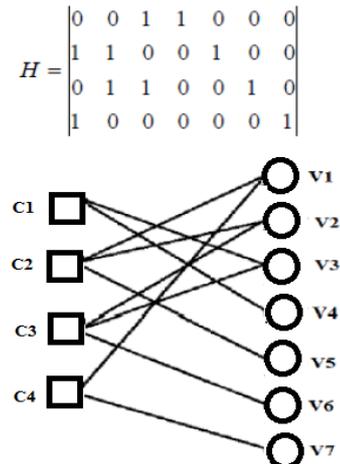


Рис. 1. Пример матрицы проверки на четность и ей соответствующая диаграмма Таннера

### Кодирование LDPC-кодов

Операция кодирования сначала заключается в нахождении генераторной матрицы G



Продолжение таблицы

20	Сложность (LE)	42126	52685	61945	71171	96705
	Макс. Частота (МГц)	105,85	104,8	103,6	102,1	95,79
	Задержка (нс)	9,45	9,54	9,65	9,80	10,44
	Пропуск.способн.(Гб/с)	2,12	2,10	2,07	2,04	1,92

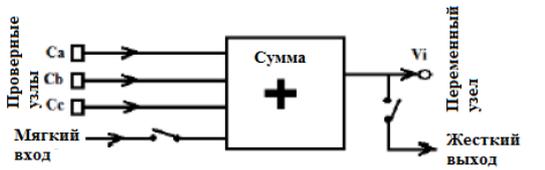


Рис. 3. Оператор обновления переменных узлов

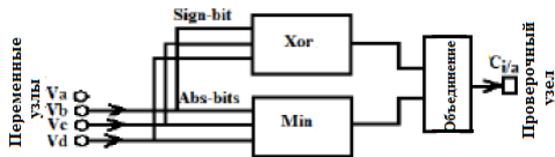


Рис. 4. Оператор обновления проверочных узлов

Функциональное моделирование на инструменте Quartus II (рис. 6) показывает реализованные параллельные вычисления, позволяющие обновлять выходы после первого активного фронта тактового сигнала, где максимальное время ожидания составляет один такт.

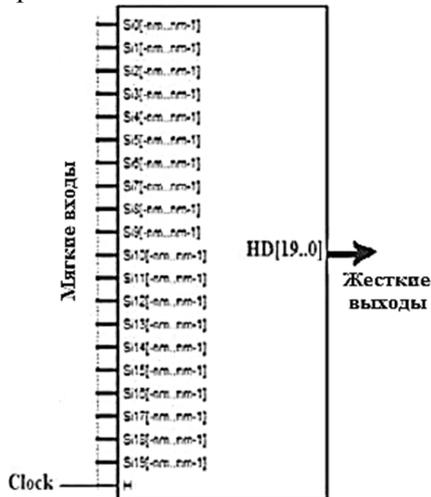


Рис. 5. Блок-схема разрабатываемого LDPC декодера

Изменение сложности по сравнению с итерациями и числом бит квантования показано на рис. 7: сложности 10-й и 20-й итераций умножаются соответственно на 5 и 10 по отношению ко второй итерации независимо от количества квантования битов.

После функционального моделирования на Quartus II проверили декодер в цифровой цепи передачи, разработанной на инструменте Simulink (рис.8). Эта цепочка со-моделирования также позволила нам измерить

эффективность BER на основе SNR для различных итераций и различных бит квантования.

На рис. 9 показаны характеристики BER декодера для реальных данных (2-я, 10-я и 20-я итерации), где можно увидеть, что значение SNR, выигранное в 10-й и 20-й итерациях, по сравнению со второй итерацией для данного BER пренебрежимо мала по сравнению со сложностью, умноженной соответственно на 5 и 10.

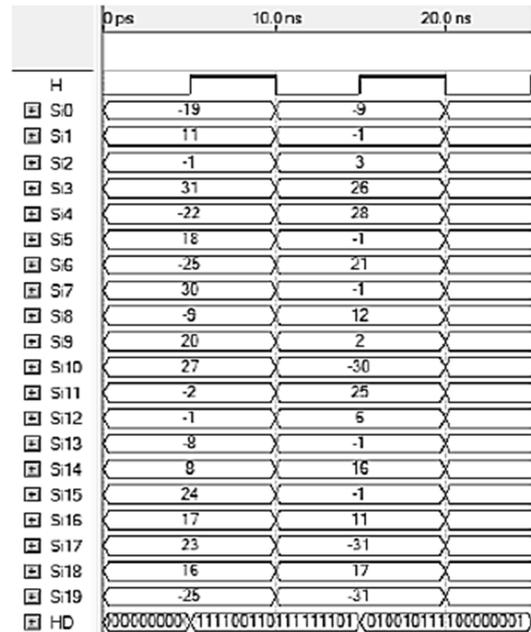


Рис. 6. Пример функционального моделирования декодера

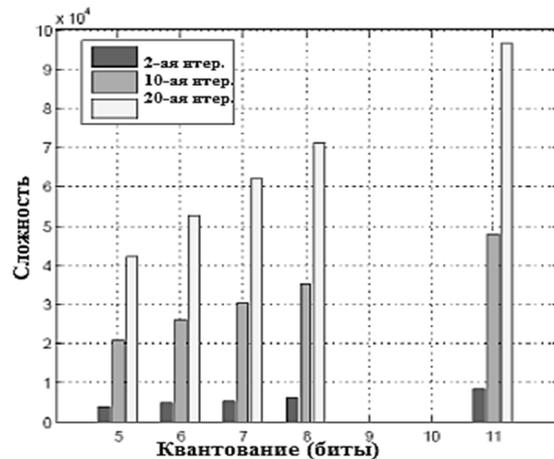


Рис. 7. Изменение сложности в зависимости от количества итераций и количества бит квантования

На рис. 10 показана характеристика BER для реализации Verilog для второй итерации (с квантованием 5 бит, 6 бит, 7 бит и 8 бит). Количественная оценка 8 бит дает результаты BER очень близкие к показателям реальных данных.

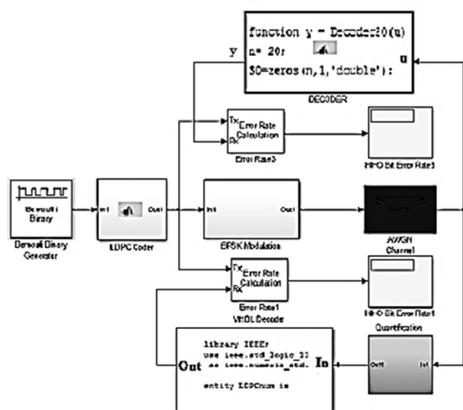


Рис. 8. Проверка платформы схемы декодера на Matlab / Simulink

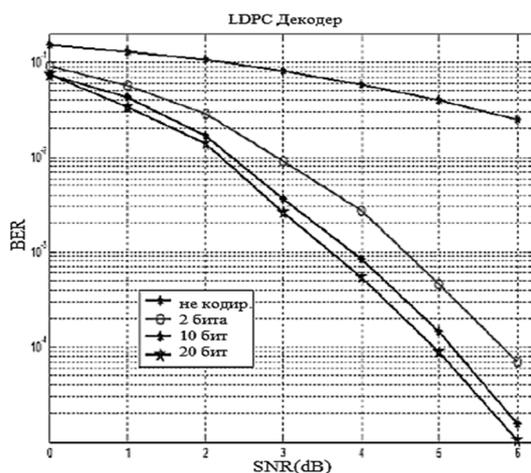


Рис. 9. Производительность BER по сравнению с SNR декодера для 2-й, 10-й и 20-й итераций

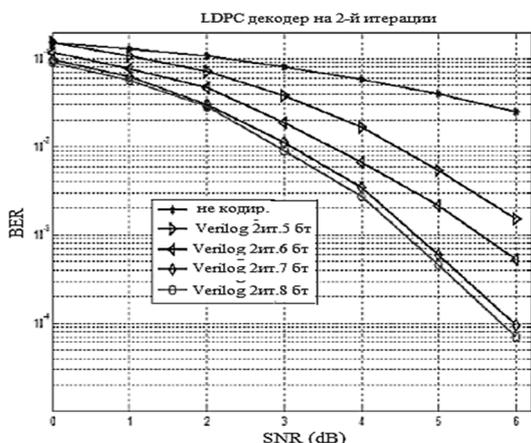


Рис. 10. Показатели BER для реальных данных, и реализация Verilog для 2-й итерации

## Заключение

В этой статье был разработан в Verilog и реализовали на ПЛИС-схеме LDPC-декодер, начиная с его матрицы проверки на четность, и определили все необходимые средства для его реализации, а именно матрицы генератора и декодирования с использованием упрощенного алгоритма декодирования BP «Min-Sum». Затем произведено тестирование и проверка его на платформе, разработанной в программном обеспечении Simulink для совместной имитации с программным обеспечением Dsp Builder.

Результаты показывают, что разработанная модель имеет высокую скорость передачи данных, низкую задержку и очень низкую сложность. BER и SNR могут быть дополнительно улучшены за счет увеличения размера кода и сохранения того же принципа параллелизма.

## Литература

- Gallager R. G. Low-density parity-check codes// IRE Trans. Inform. Theory. 1962. Vol. IT-8. pp. 21–28.
- Хорошайлова М.В. Анализ сложности алгоритмов декодирования двоичных LDPC кодов // Актуальные проблемы энергосбережения и эффективности в технических системах: тез. докл. 3-й Междунар. конф. с элементами науч. шк. 2016. С. 155-156.
- Башкиров А.В., Хорошайлова М.В. Использование вынужденной конвергенции для снижения сложности LDPC-декодирования // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 1. С. 69-73.
- Richardson T.J., Urbanke R.L. Efficient Encoding of Low-Density Parity-Check Codes// IEEE Trans. Inform. Theory. 2001. Vol. 47. pp. 638-656.
- FPGA Implementation of NIHO and SIHO Decoders for DSC Codes/ A. Boudaoud, E. Abdelmounim, A. Barazouk, J. Zbitou and M. Belkasmi// IEEE explorer. 2014. pp. 1461–1464.
- Digital Video Broadcasting (DVB) ; Second Generation framing structure, channel coding and modulation systems for broadcasting, Interactive services, news gathering and other broadband satellite applications, ETSI EN 302 307 Std. v1.1.1, (2004).
- Башкиров А.В., Коротков Л.Н., Хорошайлова М.В. Модель масштабируемого LDPC-декодера низкой мощности с использованием алгоритмического синтеза высокого уровня // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 1. С. 65-69.
- Башкиров А.В., Савинков А.Ю., Хорошайлова М.В. Реализация LDPC-декодера на массивно-параллельных вычислительных устройствах // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 6. С. 97-99.

Поступила 13.02.2018; принята к публикации 26.03.2018

**Информация об авторах**

**Хорошайлова Марина Владимировна** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pmv2205@mail.ru, тел. 8-910-732-66-13, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9167-9538>

**VERILOG-DESCRIPTION AND IMPLEMENTATION ON THE FPGA LDPC-DECODER FOR HIGH-SPEED DATA TRANSMISSION**

**M.V. Horoshaylova**

**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** this paper presents the FPGA project and the implementation of a parallel low-complexity LDPC architecture for high data transfer rate applications. This article describes the creation of a regular low density code and the study of its characteristics in terms of complexity, data transfer rate, delay, and BER as compared to the signal to noise ratio (SNR) for various iterations and quantitative estimates. The selected code is the usual (3, 4) LDPC code. Verilog model and synthesis of such architecture uses decoding by the belief propagation algorithm, simplified "Min-Sum". The complexity of the proposed architecture has been studied, it is 6335 LE with a data transfer rate of 2.12 Gbit/s for quantizing 8 bits at the second iteration. Also the article presents a platform implementation based on Simulink's joint simulation to verify the performance in the BER (Bit Error Rate) of the architecture described. The performed simulation results show that the developed decoder model has a high data transfer rate, low latency and very low complexity. BER and SNR can be further improved by increasing the code size and maintaining the same concurrency principle

**Key words:** error correction codes, low-density codes, belief propagation algorithm, Verilog language, FPGA

**References**

1. Gallager R.G. "Low-Density Parity-Check Codes," *IRE Transactions on Information Theory*, 1962, vol. 8, no. 1, pp. 21–28.
2. Horoshaylova M.V. "Analysis of the complexity of decoding algorithms for non-binary LDPC codes", *Actual problems of energy saving and efficiency in technical systems. Proc. of the 3rd International Conference with Elements of a Scientific School (Aktual'nye problemy energosberezheniya i effektivnosti v tekhnicheskikh sistemakh Tezisy dokladov 3-ey Mezhdunarodnoy konferentsii s elementami nauchnoy shkoly)*, Tambov, 2016, pp.155-156.
3. Bashkirov A.V. "Using forced convergence to reduce the complexity of LDPC decoding", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 69-73.
4. Richardson T.J., Urbanke R.L. "Efficient Encoding of Low-Density Parity-Check Codes", *IEEE Trans. Inform. Theory*, 2001, vol. 47, pp. 638-656.
5. Boudaoud A., Abdelmounim E., Barazzouk A., Zbitou J., Belkasm M. "FPGA Implementation of HIHO and SIHO Decoders for DSC Codes", *IEEE explorer*, 2014, pp. 1461 –1464.
6. "Digital Video Broadcasting (DVB), Second Generation framing structure, channel coding and modulation systems for broadcasting, Interactive services, news gathering and other broadband satellite applications", *ETSI EN 302 307 Std.*, 2004, vol. 1.1.1.
7. Bashkirov A.V. "The model of a scalable low-power LDPC decoder using high-level algorithmic synthesis", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)* 2016, vol. 12, no. 1, pp. 65-69.
8. Bashkirov A.V. "Implementation of LDPC decoder on massively parallel computing devices", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 6, pp. 97-99.

Submitted 13.02.2018; revised 26.03.2018

**Information about the author**

**Marina V. Horoshaylova**, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: [pmv2205@mail.ru](mailto:pmv2205@mail.ru), tel. 8-910-732-66-13, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9167-9538>

## *Машиностроение и машиноведение*

УДК 621.923

### **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ИМПРЕГНИРОВАННЫМ АБРАЗИВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ, ВЫДЕЛЯЮЩИМ АКТИВНЫЕ ГАЗОВЫЕ СРЕДЫ**

© 2018 В.А. Носенко, А.А. Крутикова

**Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волжский, Россия**

**Аннотация:** проведены исследования материалов из класса газообразователей, способных при термическом воздействии выделять галогены и халькогены. Возможность разложения анализировали по результатам дериватографических исследований в интервале температур от комнатной до 1000 °С. Определены изменения массы и энтальпии веществ. По результатам дериватографии выбраны следующие соединения: гексахлорпаракилол, тетраметилтиурамдисульфид и дитиодиморфин. Методом газового анализа среды в зоне шлифования подтверждено выделение газообразных продуктов из групп галогенов и халькогенов. Контролировали концентрации хлора и сернистого газа в зоне резания при работе без охлаждения при шлифовании титанового сплава ВТ6 и стали ШХ15. Установлено, что количество хлора и сернистого газа возрастает с увеличением глубины шлифования. Экспериментальные исследования проведены. Разработаны составы для импрегнирования абразивных инструментов, новизна которых подтверждена патентами. Применение рекомендованных составов при шлифовании стали ШХ15 и титанового сплава ВТ6 кругами из электрокорунда и карбида кремния обеспечивает снижение составляющих силы резания, износа абразивного инструмента и шероховатости обработанной поверхности

**Ключевые слова:** шлифование, импрегнатор, дериватографический анализ, газовый анализ, шероховатость поверхности, коэффициент шлифования

#### **Введение**

Импрегнирование оказывает положительное влияние практически на все показатели процесса шлифования: остаточные напряжения и шероховатость обработанной поверхности, режущую способность, износ и стойкость абразивного инструмента [1-3].

В качестве импрегнаторов достаточно широко используются органические соединения элементов IV-VII групп Периодической системы химических элементов [1,4,5]. Наиболее активными являются элементы VII (галогены) и VI (халькогены) групп Периодической системы.

Важным резервом повышения эффективности СОТС является их проникающая способность. В связи с этим в последнее время особое внимание уделяется газовым СОТС, обладающим высокой проникающей способностью [6].

В связи с этим в импрегнировании абразивных инструментов появилось новое направление – использование в качестве импрегнаторов специальной группы веществ (порофоров), способных выделять при термическом разложении большое количество газообразных продуктов [7, 8].

#### **Постановка цели**

На основе порофоров, выделяющих при термическом разложении азот, разработаны специальные составы для импрегнирования абразивного инструмента [9, 10]. Применение шлифовальных кругов, импрегнированных порофором, на операции обработки колец подшипников обеспечивает снижение силы резания и износа абразивного инструмента в 1,5 раза [11].

Основной причиной плохой обрабатываемости адгезионно активных металлов является налипание металла на вершины зерен шлифовального круга [12, 13]. Большие трудности возникают при обработке адгезионно-активных сплавов на основе титана [14-16], особенно без применения СОЖ [17]. В таких условиях одним из основных направлений повышения эффективности процесса шлифования является введение в зону контакта специальной среды, взаимодействие которой с активированной поверхностью металла препятствует его взаимодействию с абразивным материалом.

В связи с этим целью данной работы заключалась в повышении эффективности шлифования путем использования в качестве

импрегнаторов специальных веществ, способных выделять при термическом разложении в зоне резания газовые продукты с химически активными элементами

### Методы исследования

К числу наиболее активных элементов из группы галогенов относится хлор. Поэтому при выборе импрегнатора рассматривали хлорсодержащие соединения.

Из халькогенов наибольшее распространение получила сера.

Импрегнирование чаще всего производится расплавом серы. При шлифовании в результате температуры резания сера переходит в пастообразное состояние. Поэтому необходимо рассмотреть соединения, способные выделять при термическом разложении серосодержащие газы.

Требования, предъявляемые к импрегнаторам:

- 1) содержание активных химических элементов в составе вещества;
- 2) способность при термическом разложении выделять большое количество газообразных газов, содержащих активные компоненты;
- 3) температура начала термического разложения веществ должна соответствовать минимальной средней контактной температуре в зоне шлифования;
- 4) выделение газов должно происходить на протяжении всего периода обработки;
- 5) способность веществ растворяться в недорогих и летучих растворителях;
- 6) нерастворимость в воде.

Так как неорганические соединения в своем большинстве водорастворимы, импрегнатор подбирали из различных органических соединений.

По результатам дериватографических исследований рекомендованы следующие вещества: гексахлорпаракилол  $C_8H_4Cl_6$ , тетраметилтиурамдисульфид  $C_6H_{12}N_2S_4$  и дитиодиморфолин  $C_8H_{16}N_2O_2S_2$  [18, 19]. Установлено, что при разложении выбранных соединений при температуре 150-180 °C начинается интенсивное газообразование. Основным газом при разложении гексахлорпаракилола (ГХК) является  $Cl_2$ . При разложении тетраметилтиурамдисульфида (ТМТД) и дитиодиморфолина (ДТДМ) выделяется  $SO_2$ .

Методом газового анализа среды непосредственно в зоне шлифования подтверждено выделение предполагаемых активных газовых сред на протяжении всего периода обработки. Исследовали зависимость концентрации газов от подачи при обработке кругами из электрокорунда и карбида кремния зеленого. Обработывали, соответственно, сталь ШХ15 и титановый сплав ВТ6. Установлено, что с ростом подачи на глубину количество выделяемых активных газовых продуктов возрастает [20, 21].

Эксплуатационные показатели абразивных инструментов исследовали на операции плоского врезного шлифования стали ШХ15 на прецизионном профилишлифовальном станке с ЧПУ CHEVALIER модели Smart-B1224III. Характеристика базового абразивного инструмента – 25AF60K7V, 64CF60K7V. Импрегнирование шлифовального круга осуществляли раствором веществ методом свободного капиллярного поднятия с последующей сушкой на воздухе. Для увеличения смазочного эффекта в состав некоторых композиций вводили дисульфид молибдена.

Режимы резания при шлифовании стали ШХ15: скорость круга  $v = 30$  м/с; скорость подачи стола  $v_s = 12$  м/мин; подача на глубину – 0,005; 0,01 и 0,015 мм/ход. Выбранные импрегнаторы не растворяются в воде, поэтому испытания проведены с использованием СОЖ на водной основе (Авазол, концентрация 3%).

Режимы резания при шлифовании титанового сплава ВТ6:  $v = 30$  м/с;  $v_s = 12$  м/мин; подача 0,005 и 0,01 мм/ход с охлаждением раствором соды (0,3%). На подаче 0,005 мм/ход испытания проведены и без использования СОЖ.

В качестве основных эксплуатационных показателей процесса приняты составляющие силы резания  $P_y$  и  $P_z$ , коэффициент шлифования  $K_g$ , шероховатость обработанной поверхности  $R_a$ .

Составляющие силы резания исследовали с использованием измерительного комплекса Amti MC36-1000UP и специального программного обеспечения. Шероховатость обработанной поверхности измеряли непосредственно в рабочей зоне станка профилографом-профилометром Сейтроник в 20 сечениях по длине образца. Износ круга и съем металла измеряли индикатором часового типа с ценой деления 0,001 мм.

### Результаты

При шлифовании с подачей 0,005 мм/ход стали ШХ15 импрегнированными кругами по сравнению с базовыми составляющие силы резания уменьшаются на 7-27 %. Наибольшее снижение наблюдается при шлифовании кругом, импрегнированным ГХК (рис. 1):  $P_z$  и  $P_y$  снижаются на 26-27 %.

С увеличением подачи в два раза при шлифовании базовым кругом составляющая силы резания  $P_z$  возросла в 1,3 раза и  $P_y$  – в 1,4 раза. При шлифовании импрегнированными кругами  $P_z$  возросла в среднем 1,5 раза и  $P_y$  – в 1,4 раза. Наибольшее влияние на тангенциальную составляющую оказал импрегнатор ГХК+ $MoS_2$ . По сравнению с базовым кругом  $P_z$  снижается на 27 % (рис. 2). Наибольшее снижение радиальной составляющей (около 30 %) наблюдается при шлифовании кругами, импрегнированными DTDM и ГХК+ $MoS_2$ .

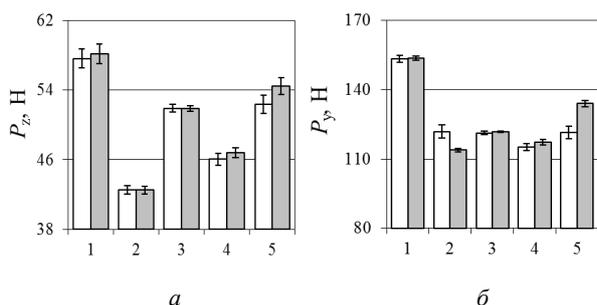


Рис. 1. Средние значения составляющих силы шлифования  $P_z$  (а) и  $P_y$  (б) на подаче 0,005 мм/ход при шлифовании базовым кругом (1) и кругами, импрегнированными ГХК (2), ГХК+ $MoS_2$  (3), DTDM (4), TMTD (5): □ – среднее за период шлифования; ■ – среднее на установившемся этапе

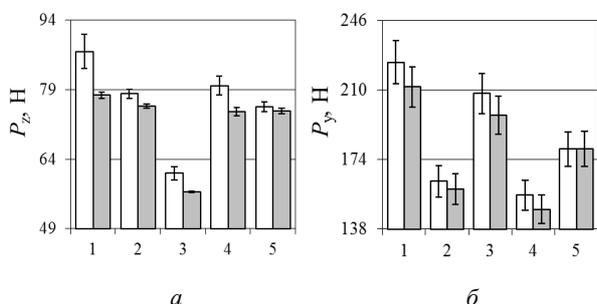


Рис. 2. Средние значения составляющих силы шлифования  $P_z$  (а) и  $P_y$  (б) на подаче 0,01 мм/ход при шлифовании базовым кругом (1) и импрегнированными ГХК (2), ГХК+ $MoS_2$  (3), DTDM (4), TMTD (5): □ – среднее за период шлифования; ■ – среднее на установившемся этапе

С увеличением подачи в 3 раза до 0,015 мм/ход наименьшие значения составляющих силы резания получены при шлифовании кругами, импрегнированными DTDM и ГХК (рис.3). По сравнению с базовым кругом составляющая  $P_z$  снижена на 21-25 %,  $P_y$  – на 37-39 %.

Применение разработанных импрегнаторов приводит к снижению шероховатости поверхности на всех режимах при шлифовании стали ШХ15 [22]. На чистовом режиме обработки с подачей 0,005 мм/ход круг, импрегнированный ГХК+ $MoS_2$ , снижает  $R_a$  по сравнению с базовым кругом 28 %, остальные импрегнаторы – на 16-25% (рис. 4, а).

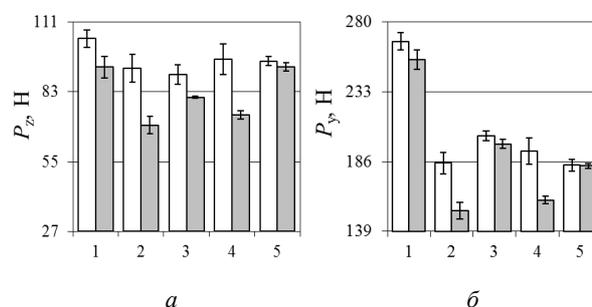


Рис. 3. Средние значения составляющих силы шлифования  $P_z$  (а) и  $P_y$  (б) на подаче 0,015 мм/ход при шлифовании базовым кругом (1) и импрегнированными ГХК (2), ГХК+ $MoS_2$  (3), DTDM (4), TMTD (5): □ – среднее по всем ходам; ■ – среднее по ходам на установившемся этапе

При шлифовании с подачей 0,01 мм/ход (рис.4, б) наибольшее снижение шероховатости поверхности также обеспечивает круг, импрегнированный ГХК+ $MoS_2$  – почти на 36 % по сравнению с базовым. Остальные импрегнаторы снижают шероховатость обработанной поверхности в среднем на 20 %. На черновом режиме шлифования с подачей 0,015 мм/ход (рис. 4, в) наибольший эффект достигнут кругом, импрегнированным DTDM,  $R_a$  снижается на 34 %. Остальные импрегнаторы снижают шероховатость поверхности на 15-27%.

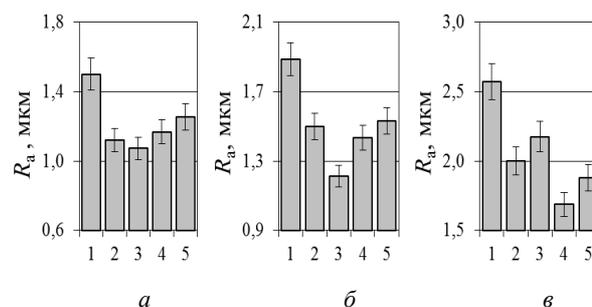


Рис. 4. Шероховатость поверхности  $R_a$  на подачах 0,005 мм/ход (а), 0,01 мм/ход (б) и 0,015 мм/ход (в): ГХК (2), ГХК+ $MoS_2$  (3), DTDM (4), TMTD (5)

Наибольшее влияние на коэффициент шлифования при обработке с подачей 0,005 мм/ход из импрегнаторов оказывает ГХК+MoS<sub>2</sub>: K<sub>g</sub> по сравнению с базовым кругом возрастает на 36 % (рис. 5, а). При шлифовании кругом, импрегнированным ГХК, коэффициент шлифования увеличивается на 31 %. Импрегнаторы TMTD и DTDM оказывают приблизительно одинаковое влияние на K<sub>g</sub>, увеличение его составляет около 23 %.

С увеличением подачи в 2 раза наибольшее значение K<sub>g</sub> обеспечивают круги 3 (ГХК+MoS<sub>2</sub>) и 4 (DTDM), увеличение коэффициента шлифования по сравнению с базовым кругом достигает 37-38% (рис. 5, б). Круги 2 (ГХК) и 4 (TMTD) K<sub>g</sub> шлифования по сравнению с базовым на 33-25 %. При обработке с подачей 0,015 мм/ход импрегнаторы оказывают приблизительно одинаковое влияние на K<sub>g</sub> (рис. 5, в). По сравнению с базовым кругом K<sub>g</sub> возрастает почти на 35%.

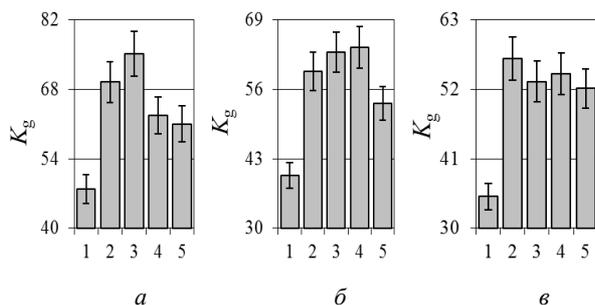


Рис. 5. Коэффициент шлифования K<sub>g</sub> на подачах 0,005 мм/ход (а), 0,01 мм/ход (б) и 0,015 мм/ход (в): ГХК (2), ГХК+MoS<sub>2</sub> (3), DTDM (4), TMTD (5)

Применение импрегнаторов на всех рассмотренных режимах обеспечивает увеличение коэффициента шлифования в среднем на 35 %.

При обработке титанового сплава наиболее эффективным импрегнатором является ГХК [19, 21] и ГХК в смеси с дисульфидом молибдена. При шлифовании без СОЖ с подачей на глубину 0,005 мм/ход по сравнению с базовым кругом коэффициент шлифования возрастает почти на 42-55 % и на 23-46 % снижается параметр R<sub>a</sub> шероховатости обработанной поверхности. При шлифовании с охлаждением на тех же режимах использование кругов, импрегнированных ГХК, снижает шероховатость обработанной поверхности по сравнению с базовым абразивным

инструментом почти на 30 %, коэффициент шлифования возрастает на 45 %

## Выводы

Применение инструмента, импрегнированного галогенообразующими импрегнаторами, при шлифовании стали ШХ15 позволило снизить составляющие силы резания на 25-40 %, параметр шероховатости обработанной поверхности R<sub>a</sub> – на 15-36 %, коэффициент шлифования увеличился в среднем на 35 %.

При обработке кругами, пропитанными халькогенообразующими импрегнаторами, радиальная составляющая силы P<sub>y</sub> снижается в среднем на 20-30 %, шероховатость поверхности уменьшается на 16-34. Коэффициент шлифования возрастает на 30 % по сравнению с обычным абразивным инструментом.

Применение ГХК рекомендовано при обработке стали ШХ15 на чистовых режимах, а при обработке ВТ6 на операциях без применения СОЖ.

TMTD рекомендован для черновых режимов при обработке ШХ15 и ВТ6. DTDM при обработке ВТ6 рекомендован для чистовых режимов на операциях без применения СОЖ, и при обработке ШХ15 - для черновых режимов.

## Литература

1. Островский В.И. Импрегнированный абразивный инструмент. М.: НИИМаш, 1983. 72с.
2. Никитин А.В. Шлифование трудно-обрабатываемых материалов импрегнированными кругами как способ повышения их режущих свойств // Инструмент и технологии. 2010. № 28. С. 52-58.
3. Nadolny K., Sienicki W., Wojtowicz M. The effect upon the grinding wheel active surface condition when impregnating with non-metallic elements during internal cylindrical grinding of titanium // Archives of civil and mechanical engineering . 2015. № 15. P. 71-86.
4. Чурилин А.В., Жуков Н.П. Импрегнирование инструмента с целью повышения энергоэффективности абразивной обработки // Достижения вузовской науки. 2013. № 6. С. 127-131.
5. Носенко В.А., Митрофанов А.П., Бутов Г.М. Исследование применения импрегнаторов из класса порофоров для пропитки абразивного инструмента // СТИН. 2011. № 8. С. 35-40.
6. Кириллов А.К. Качество обработанной поверхности детали при использовании системы экологически чистого резания // Вестник МГТУ Станкин. 2011. № 3. С. 70-73.
7. Носенко В.А., Митрофанов А.П. Исследование и применение азодикарбонамида для импрегнирования

абразивного инструмента // Физика, химия и механика трибосистем. 2010. № 9. С. 145-149.

8. Носенко В.А., Митрофанов А.П., Наумов А.Г. Модель химического взаимодействия импрегнаторов абразивного инструмента с обрабатываемым металлом // СТИН. 2014. № 3. С. 12-15.

9. Пат. 2443538 РФ, МПК В 24 D 3/34. Состав для пропитки абразивного инструмента / А.П. Митрофанов, В.А. Носенко, Г.М. Бутов; ВолГТУ. 2012.

10. Пат. 2440886 РФ, МПК В 24 D 3/34. Состав для пропитки абразивного инструмента / А.П. Митрофанов, В.А. Носенко, Г.М. Бутов; ВолГТУ. 2012.

11. Носенко В.А., Митрофанов А.П., Бутов Г.М. Повышение эффективности шлифования колец подшипников импрегнированием абразивного инструмента // Изв. ВолГТУ. Серия "Прогрессивные технологии в машиностроении". 2011. Т. 7. № 13. С. 34-36.

12. Носенко В.А., Митрофанов А.П. Повышение эффективности процесса шлифования с использованием импрегнирования абразивного инструмента // Научные технологии в машиностроении. 2012. № 11. С. 9-14.

13. Худобин Л.В., Унянин А.Н. Минимизация засаливания шлифовальных кругов. Ульяновск: УлГТУ, 299 с.

14. Носенко В.А. Шлифование адгезионно-активных металлов. М.: Машиностроение, 2000. 167 с.

15. Попутное и встречное глубинное шлифование поверхности неполного цикла с периодической правкой круга / В.А. Носенко, В.К. Жуков, А.А. Васильев, С.В. Носенко // Вестник машиностроения. 2008. № 5. С. 44-50.

16. Носенко В.А., Носенко С.В. Попутное и встречное глубинное шлифование титанового сплава с непрерывной правкой круга // Вестник машиностроения. 2010. № 11. С. 57-61.

17. Исследование химического состава поверхностного слоя титанового сплава при шлифовании его кругом из карбида кремния без использования СОТС /

С.В. Носенко, В.А. Носенко, А.А. Крутикова, Л.Л. Кременецкий // СТИН. 2015. № 1. С. 26-29.

18. Носенко В.А., Крутикова А.А., Кравцова И.С. Исследование процесса термического разложения ускорителей вулканизации в смеси с порошком железа [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования: электрон. науч. журнал РАЕ. 2014. № 2. Режим доступа: <http://www.science-education.ru/116-12797>.

19. Носенко В.А., Митрофанов А.П., Крутикова А.А. Повышение эффективности шлифования с использованием галогенообразующего импрегнатора // Известия вузов. Машиностроение. 2015. № 8. С. 65-72.

20. Носенко В.А., Крутикова А.А., Синьков А.В. Статистический анализ концентрации хлора вблизи зоны резания при шлифовании импрегнированным абразивным инструментом [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования: электрон. науч. журнал. 2013. № 4. С. 1-9. Режим доступа: <http://www.science-education.ru/110-9970>.

21. Носенко В.А., Крутикова А.А., Сидякин Ю.И. Повышение эффективности шлифования с использованием импрегнаторов, выделяющих в зоне резания активные газовые среды // Известия ВолГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. 2017. № 12 (207). С. 28-31.

22. Влияние импрегнирования на шероховатость поверхности при шлифовании подшипниковой стали / Л.К. Морозова, А.А. Крутикова, Д.С. Ушакова, О.Ю. Рошупко // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 6 (60). Ч. 3. С. 158-160.

23. Пат. 2595790 Российская Федерация, МПК В24D3/34. Состав для пропитки абразивного инструмента / В.А. Носенко, А.А. Крутикова, О.М. Новопольцева, А.П. Митрофанов; ВолГТУ. 2016.

24. Пат. 2532615 РФ, МПК В24D3/34. Состав для пропитки абразивного инструмента / А.А. Крутикова, В.А. Носенко, О.М. Новопольцева, А.П. Митрофанов; ВолГТУ. 2014.

Поступила 08.02.2018; принята к публикации 26.03.2018

#### Информация об авторах

**Носенко Владимир Андреевич** – д-р техн. наук, профессор, Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (404121, Волгоградская обл., г. Волжский, ул. Энгельса, 42а), e-mail: [nosenko@volpi.ru](mailto:nosenko@volpi.ru)

**Крутикова Анастасия Алексеевна** – старший преподаватель, Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (404121, Волгоградская обл., г. Волжский, ул. Энгельса, 42а), e-mail: [krutikova\\_vpi@mail.ru](mailto:krutikova_vpi@mail.ru)

### INCREASING THE GRINDING EFFICIENCY VIA IMPREGNATED ABRASIVE TOOLS RELEASING ACTIVE GAS MEDIA

V.A. Nosenko, A.A. Krutikova

Volzhskiy Polytechnical Institute, a branch of Volgograd State Technical University, Volzhskiy,  
Russia

**Abstract:** studies of materials of the gassing agent class, capable of releasing halogens and chalcogens under thermal action, were carried out. The possibility of decomposition was analyzed basing on the results of derivational studies in the

temperature range from room temperature to 1000 °C. The changes in mass and enthalpy of substances were determined. Based on the results of derivatography, the following compounds were chosen: hexachloroparaxylene, tetramethylthiuram disulfide and dithiodimorpholine. The gas analysis of the medium in the grinding zone confirmed the release of gaseous products relating to the of halogens and chalcogenes groups. The concentrations of chlorine and sulfur dioxide in the cutting zone were monitored during operation without cooling during grinding of the titanium alloy VT6 and the steel ShH15. It was established that the amount of chlorine and sulfur dioxide increases with the depth of grinding. Experimental studies were carried out. The compositions for the impregnation of abrasive tools were developed, the novelty of which was confirmed by the patents. The use of recommended compositions for grinding the steel ShH15 and the titanium alloy VT6 with grinding wheels of electrocorundum and silicon carbide provides a reduction in the components of cutting force, wear of the abrasive tool and roughness of the treated surface

**Key words:** grinding, impregnator, derivatographic analysis, gas analysis, surface roughness, grinding coefficient

### References

- Ostrovskiy V. I. "Impregnated abrasive tools" ("Impregnirovannyi abrazivnyy instrument"), Moscow, NIIMash, 1983, 72 p.
- Nikitin A.V. "Grinding of hard-to-work materials with impregnated wheels as a way to increase their cutting properties", *Tools and technologies (Instrument i tekhnologii)*, 2010, no. 28, pp. 52-58.
- Nadolny K., Sienicki W., Wojtewicz M. "The effect upon the grinding wheel active surface condition when impregnating with non-metallic elements during internal cylindrical grinding of titanium", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2015, no. 15, pp. 71-86.
- Churilin A.V., Zhukov N.P. "Impregnation of the tool to improve the energy efficiency of abrasive processing", *Achievements of high school science (Dostizheniya vuzovskoy nauki)*, 2013, no. 6, pp. 127-131.
- Nosenko V.A., Mitrofanov A.P., Butov G.M. "Impregnation of abrasive tools with foaming agents", *STIN*, 2011, no. 8, pp. 35-40.
- Kirillov A.K. "The quality of the machined part surface when using an environmentally friendly cutting system", *The bulletin of Moscow State Technical University. Stankin (Vestnik MGTU Stankin)*, 2011, no. 3, pp. 70-73.
- Nosenko V.A. Mitrofanov A.P. "Research and application of azodicarbonamide for the impregnation of an abrasive tool", *Physics, Chemistry and Mechanics of Tribosystems (Fizika, Khimiya i Mekhanika Tribosistem)*, 2010, no. 9, pp. 145-149.
- Nosenko V.A., Mitrofanov A.P., Naumov A.G. "Model of chemical interaction of impregnators of an abrasive tool with a work metal", *STIN*, 2014, no. 3, pp. 12-15.
- Nosenko V.A., Mitrofanov A.P., Butov G.M. "A composition for impregnation of abrasive tools" ("Sostav dlya propitki abrazivnogo instrumenta"), Patent 2443538, VolgSTU, 2012.
- Nosenko V.A., Mitrofanov A.P., Butov G.M. "A composition for impregnation of abrasive tools" ("Sostav dlya propitki abrazivnogo instrumenta"), Patent 2440886, VolgSTU, 2012.
- Nosenko V.A., Mitrofanov A.P., Butov G.M. "Improving the efficiency of grinding bearing rings by impregnating an abrasive tool", *The bulletin of Volgograd State Technical University, A series "Progressive technologies in mechanical engineering", Issue 7: interuniversity collected articles (Izv. VolgGTU, Seriya "Progressivnyye tekhnologii v mashinostroyenii", Vyp. 7: mezhvuz. sb. nauch. st.)*, Volgograd, 2011, no. 13, pp. 34-36.
- Nosenko V.A., Mitrofanov A.P. "Improving the efficiency of the grinding process with impregnation of an abrasive tool", *High technology in engineering (Naukoyomkiye tekhnologii v mashinostroyenii)*, 2012, no. 11, pp. 9-14.
- Khudobin L. V., Unyanin A. N. "Minimization of the glazing of grinding wheels" ("Minimizatsiya zasalivaniya shlifoval'nykh krugov"), Ul'yanovsk, UISTU, 299 p.
- Nosenko V.A. "Grinding of adhesion active metals" ("Shlifovanie adgezionno-aktivnykh metallov"), Moscow, Mashinostroenie, 2000, 167 p.
- Nosenko V.A., Zhukov V.K., Vasil'ev A.A., Nosenko S.V. "Down and up deep grinding of the surface of an incomplete cycle with periodic correction of the wheel", *The bulletin of Mechanical Engineering (Vestnik mashinostroyeniya)*, 2008, no. 5, pp. 44-50.
- Nosenko V. A., Nosenko S. V. "Down and up deep grinding of titanium alloy with continuous wheel correction", *The bulletin of Mechanical Engineering (Vestnik mashinostroyeniya)*, 2010, no. 11, pp. 57-61.
- Nosenko S. V., Nosenko V. A., Krutikova A. A., Kremenetskiy L. L. "Investigation of the chemical composition of the surface layer of a titanium alloy when grinding with a wheel of silicon carbide without the use of lubricant-cooling agents", *STIN*, 2015, no. 1, pp. 26-29.
- Nosenko V.A., Krutikova A.A., Kravtsova I.S. "Investigation of the process of thermal decomposition of vulcanization accelerators in a mixture with iron powder" ("Issledovanie protsessa termicheskogo razlozheniya uskoriteley vulkanizatsii v smesi s poroshkom zheleza"), *Modern problems of science and education: electron. sci. journal (Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya : elektron. nauch. zhurnal / RAE)*, 2014, no. 2, available at: <http://www.science-education.ru/116-12797>.
- Nosenko V.A., Mitrofanov A.P., Krutikova A.A. "Improving grinding efficiency using a halogen-forming impregnator", *Proceedings of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering (Izvestiya vuzov. Mashinostroyeniye)*, 2015, no. 8, pp. 65-72.
- Nosenko V.A., Krutikova A.A., Sin'kov A.V. "Statistical analysis of chlorine concentration near the cutting zone when grinding with an impregnated abrasive tool" ("Statisticheskiy analiz kontsentratsii khloro v blizi zony rezaniya pri shlifovanii impregnirovannyim abrazivnym instrumentom"), *Modern problems of science and education: electron. sci. Journal (Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya : elektron. nauch. zhurnal)*, 2013, no. 4, pp. 1-9, available at: <http://www.science-education.ru/110-9970>.

21. Nosenko V.A., Krutikova A.A., Sidyakin Yu.I. "Improving grinding efficiency with the use of impregnators, which release active gas media in the cutting zone", *The bulletin of VolgSTU. Ser. Progressive technologies in mechanical engineering (Izvestiya VolgGTU. Ser. Progressivnye tekhnologii v mashinostroyenii)*, Volgograd, 2017, no. 12 (207), pp. 28-31.

22. Morozova L.K., Krutikova A.A., Ushakova D.S., Roshchupko O.Yu. "Impact of impregnation on the surface roughness during grinding of bearing steel", *International Scientific and Research Journal*, 2017, no. 6 (60), part 3, pp. 158-160.

23. Krutikova A.A., Nosenko V.A., Novopol'tseva O.M., Mitrofanov A.P. "A composition for impregnation of abrasive tools" ("Sostav dlya propitki abrazivnogo instrumenta"), Patent 2532615, VolgSTU, 2014.

24. Nosenko V.A., Krutikova A.A., Novopoltseva O.M., Mitrofanov A.P. "A composition for impregnation of abrasive tools" ("Sostav dlya propitki abrazivnogo instrumenta"), Patent 2595790, VolgSTU, 2016.

Submitted 08.02.2018; revised 26.03.2018

#### Information about the authors

**Vladimir A. Nosenko**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Volzhskiy Polytechnical Institute, the branch of Volgograd State Technical University (42a Engels str., Volzhskiy 404121, Volgograd region, Russia), e-mail: [nosenko@volpi.ru](mailto:nosenko@volpi.ru)

**Anastasia A. Krutikova**, Assistant Professor, Volzhskiy Polytechnical Institute, the branch of Volgograd State Technical University (42a Engels str., Volzhskiy 404121, Volgograd region, Russia), e-mail: [krutikova\\_vpi@mail.ru](mailto:krutikova_vpi@mail.ru)

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ДЕФЕКТОВ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ ЛИТЫХ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ

© 2018 М.Н. Давыдов<sup>1</sup>, К.О. Беляева<sup>2</sup>, Ю.С. Ткаченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Общество с ограниченной ответственностью «Центр неразрушающего контроля», г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** в данной статье рассмотрен метод определения фронтальных и реальных размеров образов дефектов при ультразвуковом контроле корпусов магистральных нефтяных насосов из стали марки 20ГЛ с применением дефектоскопа с цифро-фокусированными антенными решетками. Описаны факторы, которые усложняют и в некоторых случаях делают невозможным классический ультразвуковой контроль одноэлементным преобразователем узлов деталей рассматриваемого типа. Представлено применяемое оборудование, строение антенной решетки, принцип работы и его настройка по стандартному образцу предприятия. Найдены максимально допустимые фронтальные размеры образов дефектов. Рассмотрена зависимость фронтальных размеров образов дефектов от глубины их залегания в изделии. По полученным данным построен график зависимости фронтального размера образа от глубины залегания. С помощью этого графика возможно определить максимально допустимые размеры образов дефектов для промежуточной глубины, исключая расчеты. Проведена апробация исследований, описан самый распространенный дефект в рассматриваемом изделии - «рыхлота», его визуальный образ при ультразвуковом контроле с применением цифро-фокусированных антенных решеток. Выведена формула определения размеров дефектов при контроле литых корпусов магистральных нефтяных насосов, изготовленных из стали марки 20ГЛ

**Ключевые слова:** литые детали, корпусные детали, неразрушающий контроль, ультразвуковой контроль, антенная решетка

### Введение

Ультразвуковой контроль (УЗК) литых корпусных деталей является одним из наиболее сложных по причине нескольких факторов:

- сложная форма, разность толщин и кривизна поверхности,
- трудности в определении размеров и ориентации дефектов в изделии,
- затухание ультразвуковых волн из-за крупнозернистой структуры материала.

К таким объектам контроля относится литой корпус магистрального нефтяного насоса (МНН), при УЗК которого приходится сталкиваться со многими вышеперечисленными факторами [1]. Применение ультразвуковых дефектоскопов с цифро-фокусированными антенными решетками (ЦФАР), по сравнению с классическими дефектоскопами, позволяет:

- визуализировать внутреннюю структуру изделия, представив его в виде изображения сечения,
- осуществлять контроль труднодоступных мест,
- изменять рабочую частоту, решив проблему затухания ультразвуковых волн.

Целью работы является демонстрация возможностей УЗК с применением ЦФАР,

определение допустимых фронтальных и реальных размеров дефектов при контроле литой корпусной детали из стали марки 20ГЛ.

### Оборудование и объект контроля

Объектом контроля является литой корпус нефтяного насоса (рис. 1), изготовленный из стали марки 20ГЛ, с номинальной толщиной стенки – 50 мм, в некоторых местах достигающей 100 мм. Контроль на участках 1Л, 2Л, 3Л возможно провести только многоэлементным датчиком по причине недостаточной зоны контроля для установки одноэлементного пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП). Этот факт не позволяет провести контроль на всю толщину на данных участках.

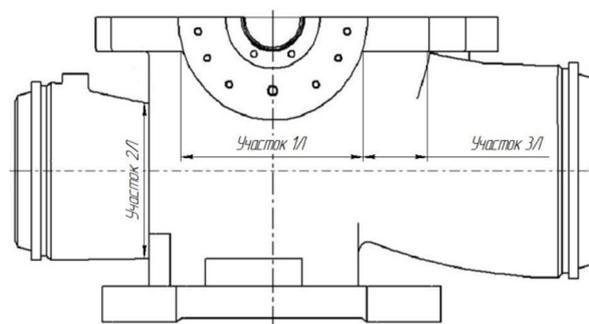


Рис. 1. Литой корпус МНН

Для проведения испытаний был выбран ультразвуковой дефектоскоп-томограф A1550 IntroVisor (рис. 2), выпускаемый ООО «АКС» (г. Москва). Его технические характеристики позволяют выполнить поставленную задачу [2].



Рис. 2. Ультразвуковой дефектоскоп A1550 IntroVisor

В состав прибора входит электрический блок и антенная решетка (АР), которая представляет собой набор однотипных пьезоэлементов, расположенных вдоль одной линии на протекторе (рис. 3) [3].

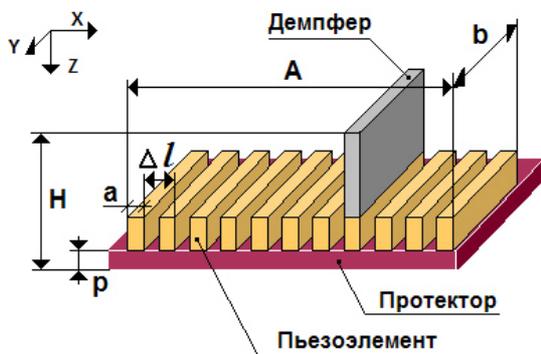


Рис. 3. Конструкция АР

Настройка производится по стандартному образцу предприятия (СОП) (рис. 4), изготовленному из материала того же структурного класса, что и объект контроля. Это исключает разницу в скорости и затухании ультразвуковой волны.

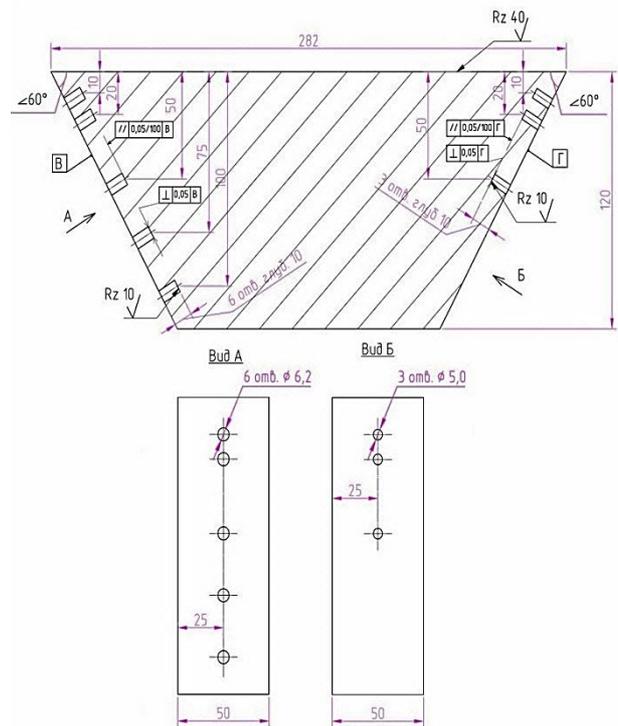


Рис. 4. Стандартный образец предприятия (СОП)

В СОП с двух сторон имеются отверстия – контрольные отражатели (КО): 5 отверстий диаметром 6.2 мм, 3 отверстия диаметром 5.0 мм, их размер соответствует максимально допустимому размеру дефекта в соответствии с нормативно-технической документацией (НТД) на контролируемое изделие.

### Исследование и настройка оборудования

Для калибровки и настройки дефектоскопа необходимо получить образы от всех КО [4]. В соответствии с НТД на данный объект контроля, размер максимально допустимого дефекта, для глубины до 100 мм, равняется 6.2 мм, поэтому настройка производится по КО диаметром 6.2 мм.

Установив АР в положение (1) (рис. 5), на экране получаем изображение (рис. 6). Отчетливо наблюдаются образы от КО 1 и КО 2, расположенные на глубине 10 и 25 мм.

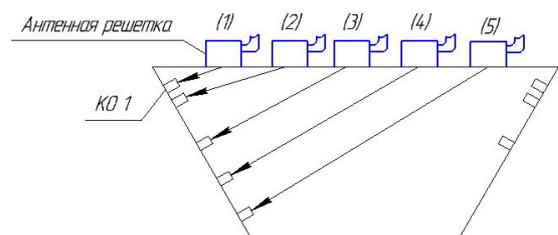


Рис. 5. Положения АР на СОП во время настройки

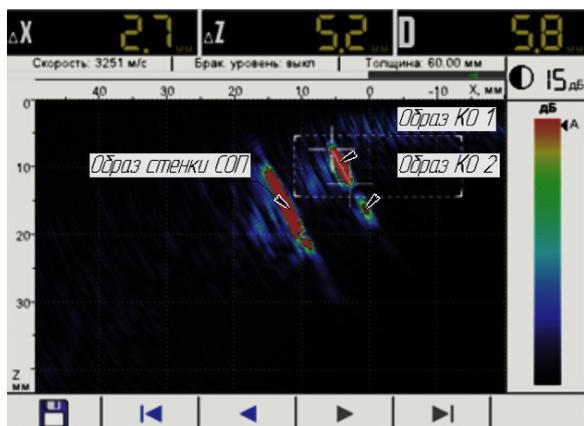


Рис. 6. АР установлена в положение (1)

Линейно перемещая АР, как показано на рисунке 5, в положения (2), (3), (4), (5), получаем сигналы от КО 2, КО 3, КО 4 и КО 5, глубины которых: 25, 50, 75 и 100 мм. С помощью встроенных функций дефектоскопа производится измерение фронтальных размеров образов, полученных от КО (рис. 6, 7, 8, 9) [4].

Образ КО 1 расположен на глубине 10 мм, его фронтальная протяженность равняется  $D=5.8$  мм (рис. 7).

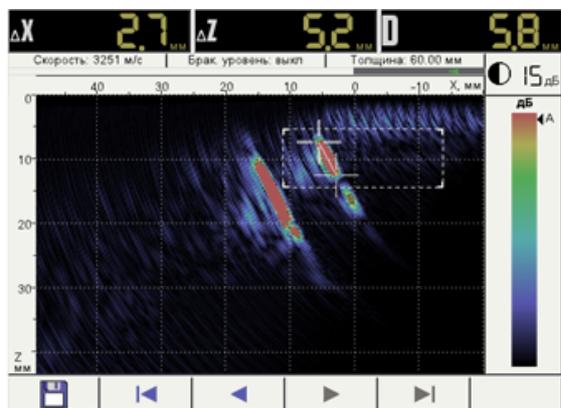


Рис. 7. Образ КО 1

Установив АР в положение (2), получаем образ КО 2, фронтальная протяженность которого равняется  $D=6.4$  мм (рис. 8).

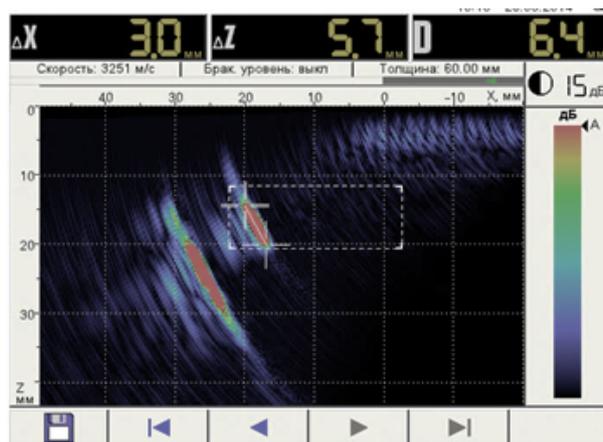


Рис. 8. Образ КО 2

Фронтальная протяженность образа КО 3 на глубине 50 мм:  $D=11.0$  мм (рис. 9).

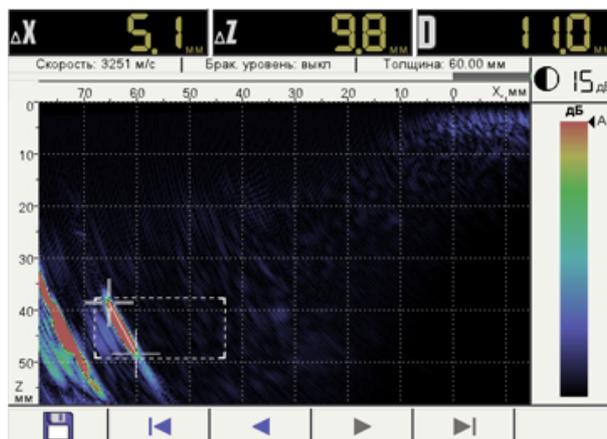


Рис. 9. Образ КО 3

Фронтальная протяженность образа КО 4 на глубине 75 мм:  $D=18.9$  мм (рис. 10).

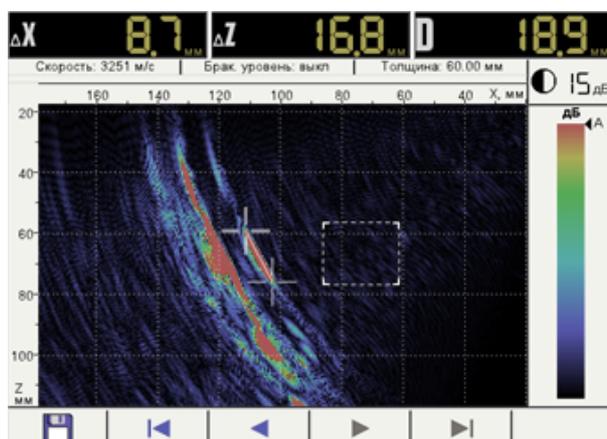


Рис. 10. Образ КО 4

Фронтальная протяженность образа КО 5 на глубине 100 мм:  $D=22.2$  мм (рис. 11).

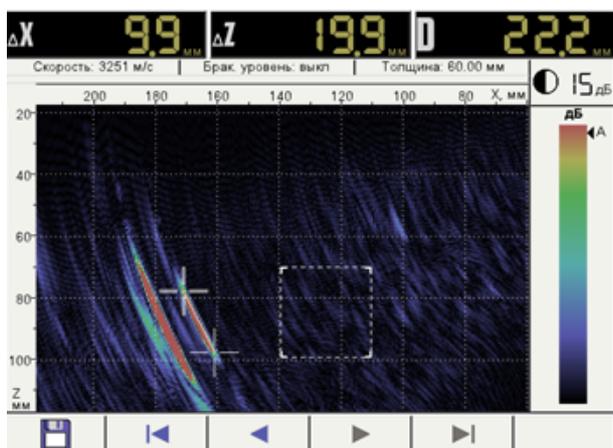


Рис. 11. Образ КО 5

Таким образом, найдены максимально допустимые фронтальные размеры несплошностей  $D$  для различной глубины залегания:

- $D_1=5.8$  мм на глубине  $Z_1=10$  мм;
- $D_2=6.4$  мм на глубине  $Z_2=20$  мм;
- $D_3=11.0$  мм на глубине  $Z_3=50$  мм;
- $D_4=18.9$  мм на глубине  $Z_4=75$  мм;
- $D_5=22.2$  мм на глубине  $Z_5=100$  мм.

В результате установлена зависимость фронтального размера образа КО от глубины его залегания. Дальнейший контроль производится с учетом проведенных измерений, то есть, обнаружив дефект на глубине 100 мм, его допустимая фронтальная протяженность равна 22.2 мм на экране дефектоскопа, что эквивалентно 6.2 мм на СОП.

Чтобы вычислить значения допустимых фронтальных размеров несплошностей для промежуточных глубин  $Z$ , необходимо линейно аппроксимировать размер  $D$  [4].

Например, обнаружив несплошность с фронтальной протяженностью  $D_x=15$  мм на глубине  $Z_x=60$  мм, которая попадает в интервал между  $Z_3$  и  $Z_4$ , вычисляем  $D_{max}$  для глубины  $Z_x=60$  мм по формуле:

$$D_{max} = D_3 + \frac{(D_4 - D_3) * (Z_x - Z_3)}{(Z_4 - Z_3)}, \quad (1)$$

$$D_{max} = 11 + \frac{(18.9 - 11) * (60 - 50)}{(75 - 50)} = 16.3 \text{ мм.}$$

Выясняем, что данная несплошность  $D_x=15$  мм по фронтальной протяженности является допустимой, так как не превышает значения максимально допустимой фронтальной протяженности  $D_{max}$  для глубины  $Z_x=60$  мм.

По полученным данным построим график зависимости фронтального размера от

глубины залегания (рис. 12), с помощью которого можно без расчетов определять значения фронтальных размеров для промежуточных глубин.



Рис. 12. График зависимости фронтального размера от глубины

### Апробация исследований

Одним из самых распространенных дефектов в рассматриваемом изделии является «рыхлота» - дефект отливки в виде скопления мелких усадочных раковин [5]. Признаком данного дефекта является то, что образ дефекта состоит из цепочки мелких образов.

На рис. 13 изображен визуальный образ дефекта типа «рыхлота», фронтальная протяженность которого равняется  $D_x=23.7$  мм, центр несплошности находится на глубине  $Z=50$  мм. Для данной глубины максимально допустимый размер фронтальной протяженности  $D_{max}=11$  мм, следовательно, выявленная несплошность недопустима.

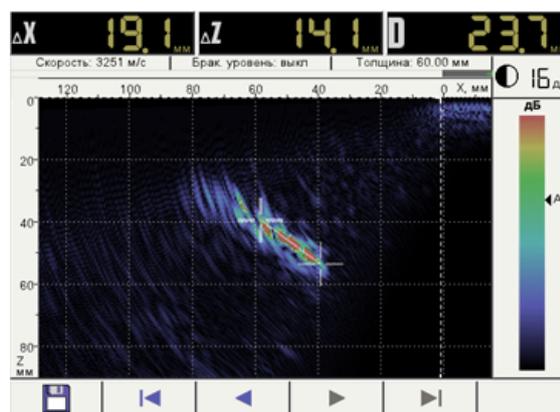


Рис. 13. Визуальный образ дефекта типа «рыхлота» на экране дефектоскопа

Для нахождения реального размера несплошности выведена формула (2):

$$D = \frac{D_{KO}}{D_{max}} * D_x, \quad (2)$$

$$D = \frac{6.2}{11.0} * 23.7 \approx 13.36 \text{ мм.}$$

На рис. 14 представлен фрагмент литого корпуса МНН из стали 20 ГЛ с залегающим в нем дефекте типа «рыхлота».



Рис. 14. Фрагмент литого корпуса МНН (×5)

Стоит обратить внимание, что образ дефекта, полученный на экране дефектоскопа, почти не отличается от того, как он выглядит в действительности.

### Выводы

Использование дефектоскопа с ЦФАР при УЗК литых корпусных деталей дает возможность наглядно и достаточно достоверно судить о качестве изделия.

При настройке прибора наблюдается зависимость фронтального размера образа

дефекта от глубины его залегания в изделии. Сопоставив размер, полученный путем измерения, и реальный размер контрольного отражателя, мы имеем допустимые фронтальные размеры при контроле литых корпусов МНН из стали 20ГЛ с применением ЦФАР.

Составив график зависимости фронтального размера образа от глубины его залегания, упрощается и ускоряется поиск значения допустимого размера для промежуточных глубин. Из полученных данных при помощи формулы (2) можно выяснить реальные размеры залегающих в изделии дефектов при контроле литых корпусов МНН из стали 20ГЛ.

### Литература

1. Давыдов М.Н., Ткаченко Ю.С. Особенности выявления различно-ориентированных в пространстве дефектов ультразвуковым методом, с применением антенных решеток // Авиapersпектива: регион. сб. науч. тр. Воронеж, 2017. Вып. 1. С. 148-157.
2. ООО «АКС» Дефектоскоп ультразвуковой А1550 IntroVisor. Руководство по эксплуатации. М. 2015. 88 с.
3. Заглянуть в металл. Теперь это просто / В.Г. Шевалдыкин, С.Г. Алехин, А.В. Бишко, А.В. Дурейко, А.А. Клементьев, Н.Ю. Соколов, А.А. Самокрутов // В мире неразрушающего контроля. 2008. № 1 (39). С. 46-53.
4. ООО «АКС-Сервис» Методические указания по применению ультразвукового дефектоскопа А1550 IntroVisor с цифро-фокусированными антенными решетками в режиме ТОМОГРАФ. М. 2014. 82 с.
5. ГОСТ 19200-80 Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов. 1989. 15 с.

Поступила 05.02.2018; принята к публикации 23.03.2018

### Информация об авторах

**Давыдов Максим Николаевич** – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: mounta1n@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0586-5244>

**Беляева Ксения Олеговна** – инженер по неразрушающему контролю, ООО «ЦНК» (394019, Россия, г. Воронеж, Газовая, 2А), e-mail: renesmi\_2012@bk.ru

**Ткаченко Юрий Сергеевич** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kafedra-ao@mail.ru

## DETERMING SIZES OF DEFECTS AT ULTRASONIC INSPECTION OF THE CASTING DETAILS

M.N. Davydov<sup>1</sup>, K.O. Belyaeva<sup>2</sup>, Y.S. Tkachenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>LLS «Center for Non-Destructive Testing», Voronezh, Russia

**Abstract:** in this paper, a method for determining the front and real dimensions of the defect images during ultrasonic inspection of the main oil pump casings from 20GL steel with the use of a defectoscope with digital-focused antenna arrays is considered. The factors are described that complicate and, in some cases, make impossible to use classical ultrasonic testing by a single-element converter of parts of the type in question. The applied equipment, the structure of the antenna array, the principle of operation and its adjustment according to the standard model of the enterprise are presented. The maximum allowable frontal dimensions of the defect images are found. The dependence of the frontal dimensions of the defect images on the depth of their occurrence in the article is considered. According to the obtained data, a graph of the dependence of the frontal size of the image on the depth of occurrence is constructed. With the help of this graph it is possible to determine the maximum permissible sizes of defect images for intermediate depth, excluding calculations. Approbation of the studies was carried out, the most common defect in the product under consideration is "looseness", its visual image with ultrasound control using digital-focused antenna arrays. A formula was derived for determining the dimensions of defects, for the inspection of cast shells of main oil pumps made of steel grade 20GL

**Key words:** castings, basic parts, non-destructive testing, ultrasonic inspection, antenna array

#### References

1. Davydov M.N., Tkachenko Y.S. "Features of detecting variously-oriented defects in space by ultrasonic inspection, using antenna arrays", *Air perspective ("Aviaperspektiva")*, Voronezh, 2017, pp. 148-157.
2. LLS «ACS» Ultrasonic Flaw Detector A1550 IntroVisor. Manual ("Defektoskop ul'trazvukovoy A1550 IntroVisor. Rukovodstvo po ekspluatatsii"), Moscow, 2015, 88 p.
3. Shevaldykin V.G., Alehin S.G., Bishko A.V., Dureyko A.V., Klement'ev A.A., Sokolov N.Yu., Samokrutov A.A. "To look into the Metal. It's easy" ("Zaglyanut' v metall. Teper' eto prosto"), *In the world of non-destructive control (V mire nerazrushaeshchego kontrolya)*, 2008, no. 1 (39), pp. 46-53.
4. LLS «ACS-Service» Methodical instructions for the use of the A1550 IntroVisor ultrasonic flaw detector with digitally focused antenna arrays in the TOMOGRAPH mode ("Metodicheskie ukazaniya po primeneniyu ul'trazvukovogo defektoskopa A1550 IntroVisor s tsifro-fokusirovannymi antennymi reshetkami v rezhime TOMOGRAF"), Moscow, 2014, 82 p.
5. GOST 19200-80 "Castings of cast iron and steel. Terms and definitions of defects" ("Otlivki iz chuguna i stali. Terminy i opredeleniya defektov"), 1989, 15 p.

Submitted 05.02.2018; revised 23.03.2018

#### Information about the authors

**Maxim N. Davydov**, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospect, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: mountaln@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0586-5244>

**Kseniya O. Belyaeva**, Engineer, LLS «Center for Non-Destructive Testing» (2A Gazovaya, Voronezh, 394019, Russia), e-mail: renesmi\_2012@bk.ru

**Yuriy S. Tkachenko**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospect, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: kafedra-ao@mail.ru

## ОБРАБОТКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ МОЩНЫМИ ИОННЫМИ ПУЧКАМИ

© 2018 М.Ю. Турищев, Ю.А. Тишанинов, О.В. Горожанкина

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** данная статья посвящена вопросу практического использования мощных ионных пучков в современной промышленности. Рассматривается одно из современных направлений развития физики твердого тела – воздействие мощных ионных пучков на твердые материалы. Представлены результаты исследования пучково-эрозионной обработки и упрочнения изделий с использованием мощных ионных пучков. Результаты, полученные в различных исследовательских центрах и закрепленные патентами РФ, демонстрируют широкие возможности обработки материалов и улучшение эксплуатационных характеристик изделий из них. Повышение прочности изделий (повышение срока службы) при воздействии мощных ионных пучков основано на структурных изменениях поверхностного слоя. Показана возможность эффективного использования мощных ионных пучков для очистки поверхности изделий, в том числе в качестве промежуточной технологической обработки поверхности деталей перед нанесением покрытий. На широком классе металлов и сплавов продемонстрировано реальное улучшение таких эксплуатационных характеристик, как усталостная прочность, износостойкость, повышение значений микротвердости, выглаживание поверхности, снижение уровня адгезионного взаимодействия между режущим инструментом и обрабатываемым материалом, а после предварительной обработки изделий мощными ионными пучками - возрастание адгезии износостойкого покрытия

**Ключевые слова:** мощные ионные пучки, поверхностный слой, упрочнение, очистка

### Введение

Ограниченный уровень свойств материалов является основной преградой для успешного развития технологии. В последние годы поверхности и поверхности раздела материалов являются предметом углубленного изучения как теоретического, так и прикладного материаловедения. Пучковые методы модификации свойств твердых тел находят все большее применение. Высокую эффективность для направленной модификации физико-механических и химических свойств металлов и сплавов имеют мощные ионные пучки (МИП). Мощный ионный пучок – это концентрированный поток частиц (плазмы различного состава). С помощью модификации МИП улучшают следующие свойства материала: микротвёрдость, коррозионную стойкость и износостойкость. МИП облучение включает в себя очень интересный феномен - соединение теплового поля и поля напряжений.

В границах тонкого поверхностного слоя модификация МИП позволяет получить высокую плотность энергии в короткий промежуток времени, что обеспечивает быстрый нагрев и охлаждение с высоким температурным градиентом, быстрое плавление, испарение, плазменную абляцию и формирование полей тепловых напряжений и ударных волн. На обработанной поверхности и поверхностном слое, а

также и на глубине порядка сотен микрометров, наблюдаются значительные изменения механических и трибологических свойств.

### Пучково-эрозионная обработка

Воздействие МИП на мишени изменяет энергетические характеристики поверхности, удаляет легкоплавкие примеси, углеводородные загрязнения, с повышением плотности тока идет интенсивное удаление поверхностного слоя [1]. За один импульс тока могут быть удалены слои толщиной 0,1-1 мкм, что способствует эффективности такой обработки. Пучково-эрозионную обработку можно использовать для очистки поверхности изделий перед нанесением покрытий различного назначения. При использовании ускорителя «ТЕМП» полные энергозатраты составляют 0,1-1 кВт ч/м<sup>2</sup>. Также после предварительной обработки изделий МИП возрастает адгезия износостойкого покрытия, в частности нитрида титана [2].

В работе [3] пучково-эрозионная обработка была использована для очистки лопаток ГТД, отработавших регламентный режим на двигателе. В процессе работы лопаток на их поверхности образуется нагар, происходит формирование оксидов титана (BT18Y и BT9), железа и хрома. Облучение МИП с плотностью тока > 100 А/см<sup>2</sup> приводит к удалению окисленных слоев, нагара и к изменению физико-

химического состояния. Рабочие параметры лопаток из сплавов ВТ9, ВТ18У удается повысить до уровня исходных серийных лопаток.

Процесс пучково-эрозионного восстановления эксплуатационных свойств деталей машин [4] реализуется следующим образом.

В рабочую камеру сильноточного ионного ускорителя загружают ремонтируемые детали. Далее проводится облучение импульсами длительностью в десятки (тысячи) наносекунд. Путем изменения плотности тока сильноточного ускорителя при фиксированной энергии ионов получают требуемую плотность энергии в диапазоне 1-10 Дж/см<sup>2</sup>. Например, для энергии ионов углерода 300 кэВ плотность тока для достижения требуемых значений плотности энергии лежит в пределах 70-700 А/см<sup>2</sup>.

Необходимая плотность энергии определяется следующими факторами: длительностью воздействия МИП, материалом мишени или теплофизическими характеристиками покрытия, которое требуется удалить или очистить, толщиной удаляемого слоя.

Детали подвергаются воздействию МИП таким количеством импульсов, которого достаточно для удаления всего поврежденного при эксплуатации слоя. По результатам экспериментов, для удаления поврежденных слоев достаточно 10 импульсов. Затем изделия помещают в вакуумную печь и выдерживают при температуре эксплуатации детали в течение 0,1-2 ч. Если ремонтируемое изделие эксплуатируется при низких температурах, то диффузионный отжиг проводится при тех же условиях, что и во время финишной стабилизирующей термообработки деталей или заготовок, выпускаемых по серийной технологии.

МИП применяется для удаления поверхностных загрязнений (оксидов, продуктов сгорания топлива, оксихлоридов, халькогенидов и др.) на стадии формирования пароплазменного облака в начальный момент облучения; удаления поверхностных неоднородностей (сглаживание макрорельефа) при плавлении материала поверхности; наведения в приповерхностных областях, толщиной 5-7 мкм, остаточных напряжений вследствие образования большого количества дефектов на стадиях формирования волны сжатия и распространения ударной волны; релаксации остаточных напряжений, рекристаллизация структуры и идеализации кристаллической решетки при диффузном отжиге детали. Это обусловлено физическими процессами, протекающими в поверхностном слое в

результате ионно-лучевой (с использованием мощных наносекундных пучков) и последующей термической обработками.

Такая комплексная обработка приводит не только к высокоинтенсивному удалению с поверхности изделия загрязнений и продуктов коррозии, но и к упрочнению материала за счет структурно-фазовых превращений.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать следующие выводы:

- в результате обработки МИП отработавших свой ресурс деталей машин поверхностные слои деталей по составу, структуре и эксплуатационным характеристикам возвращаются в исходное до эксплуатации состояние [1];

- по некоторым из характеристик обработанные детали значительно улучшают свои эксплуатационные свойства (сопротивление эрозии, солевой коррозии, шероховатость, наличие окислов и глубина их залегания и т.п.).

МИП возможно применять для восстановления эксплуатационных свойств деталей из жаропрочных сплавов [5] с жаростойкими покрытиями.

Обрабатываемые детали помещают в рабочую камеру ускорителя ионов "Темп". Облучение проводится импульсами наносекундной длительности с частотой их следования 1-80 Гц. Требуемая плотность потока энергии достигается варьированием плотности ионного или электронного тока, кинетической энергией ускоренных частиц, длительностью импульсов тока и геометрией диодной системы. В зависимости от конкретной цели (модификация поверхности, очистки поверхности или удаление покрытий) работа ведется в ионном или электронном режиме.

Исходя из требования возможности реализации процесса высокопроизводительного удаления поврежденных при эксплуатации покрытий (толщиной более 200 мкм) на жаропрочных материалах устанавливается верхняя граница плотности энергии 30 Дж/см<sup>2</sup> при частоте следования импульсов 80 Гц и количестве импульсов >100.

Для модификации поверхностных слоев и восстановления эксплуатационных свойств материала устанавливают нижнюю границу плотности энергии 0,1 Дж/см<sup>2</sup> и частоту следования импульсов 1 Гц, при этом количество импульсов может быть существенно снижено и ограничено.

После облучения детали помещают в вакуумную печь и выдерживают при температуре

их эксплуатации в течение 0,5-2 ч. При необходимости на поверхность изделий может быть нанесено новое защитное покрытие.

Указанным способом обеспечивается решение уникальной технологической задачи: удаление отработанных защитных покрытий значительной толщины (200 мкм) при одновременном восстановлении эксплуатационных свойств изделия.

Таким образом, показана возможность эффективного использования МИП для очистки поверхности изделий как в качестве промежуточной технологической обработки поверхности деталей перед нанесением покрытий (это может быть использовано в одном технологическом цикле), так и в качестве ремонтной операции по финишной очистке лопаток от нагара, оксидов.

#### Упрочнение изделий с использованием мощных ионных пучков

Основными факторами, определяющими изменение свойств и структурно-фазовое состояние при облучении материалов МИП, являются нестабильное температурное поле и различные виды полей напряжения, возникающие при неоднородном нагреве мишени [6]. Температурное поле, возникающее в материале мишени при облучении МИП, может быть получено при решении нестационарного уравнения теплопроводности.

В момент начала плавления материала термоупругое и квазистатическое поля напряжений рассматриваются как показано на рис. 1а. Термоупругая волна напряжения ( $\sigma_x$  – распространяется в мишени со скоростью звука) генерируется силой инерции, направленной против быстрой упругой деформации, которая вызвана большим температурным градиентом внутри подложки. Сжимающее квазистатическое напряжение ( $\sigma_y$ ) генерируется ограничено на поверхности против бокового теплового расширения. Растет температура на поверхности, в приповерхностном слое начинается плавление. Поэтому локально расплавленные капельки формируются ниже поверхности, как показано на рис. 1б. Давление жидкости, результирующая сила Р квазистатического поля теплонпряженности и жидкого объемного расширения проявляются на каплях и передаются каплями во все стороны. Сила Р по направлению пучка составляет источник ударной волны. Ударная волна может быть увели-

чена при увеличении температуры и схематично представлена как волновое колебание (рис. 1б). Если тонкий поверхностный слой не может выдержать этого давления, происходит образование кратера (рис. 1с). После образования кратера напряжение сжатия действует как показано на рис. 1с.

На всей облученной поверхности наблюдаются равномерно распределенные кратеры, некоторые имеют дыры в центре (рис. 2а). О локальном плавлении металла можно судить по удельной симметрии кратеров. Такая морфология поверхности является следствием плавления приповерхностного слоя и извержения расплавленного металла через твердый поверхностный слой. Также наблюдается скопление вакансий на границах зерна и предполагается, что извержение происходит предпочтительно в дефектных зонах, где создание вакансий наиболее просто. Глубина плавящегося слоя приблизительно 1 мкм.

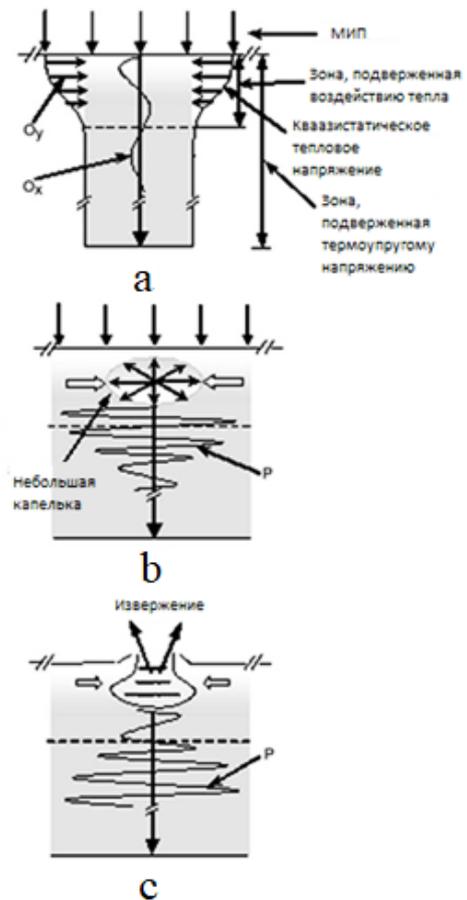


Рис. 1. Принципиальная схема распределения температуры и полей напряжения при облучении МИП. а - дает расположение различных действий только после начала облучения, б и с показывают процедуру извержения расплава и формирования импульса отдачи, которые образуются в мишени

Повышение прочности изделий (повышение срока службы) при воздействии МИП основано на структурных изменениях поверхностного слоя. Они характеризуются формированием перекристаллизационного слоя глубиной ~1-10 мкм [1]. Перекристаллизация препятствует развитию существующих микротрещин, движению дислокаций, влияет на микротвердость. За счет растворенного и адсорбированного углерода и перемешивания компонентов поверхностного слоя образуются карбиды. Образование доли карбидов ведет к увеличению микротвердости. В зависимости от параметров пучка и теплофизических свойств металла наблюдается образование своеобразного микрорельефа. Для некоторых металлов (например, титана и ряда сплавов на его основе) наблюдается эффект полировки [1, 8]. В совокупности эти процессы приводят к модификации поверхностного слоя, улучшению коэффициента трения, износостойкости, коррозионной стойкости.

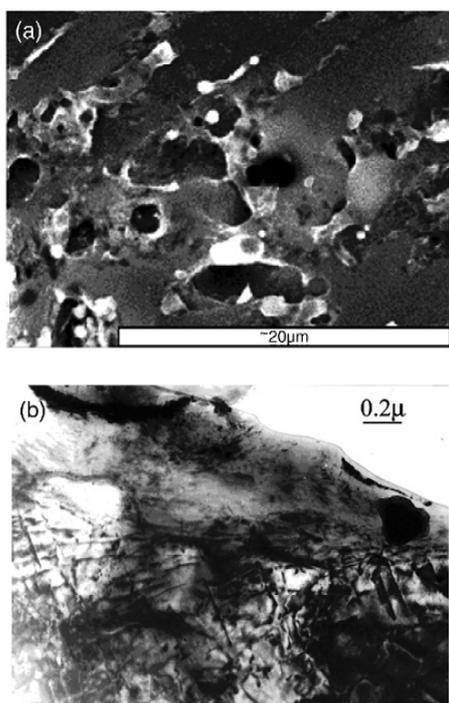


Рис. 2. Микроструктура облученной поверхности  
а - кратеры на поверхности алюминия, облученного пятью импульсами; б - профильная ТЕМ фотография, показывающая плавление поверхности алюминия одним импульсом

В работе [7] проведено исследование влияния плотности тока при облучении нержавеющей стали 316L (состав:  $C \leq 0,03\%$ ,  $Si \leq 1\%$ ,  $Mn \leq 2\%$ ,  $P \leq 0,035\%$ ,  $S \leq 0,03\%$ ,  $12,0-15,0\%$  Ni,  $16,0-18,0\%$  Cr и  $2,0-3,0\%$  Mo) на микротвер-

дость, износостойкость, коррозионную и усталостную стойкость. Облучение образцов проводилось при следующих условиях: энергия ионов  $E = 300$  кэВ, плотность тока 100, 200 и  $300 \text{ A/cm}^2$ , количество импульсов  $N=10$ , длительность импульса  $\tau=75$  нс, флуктуации плотности тока в импульсах ограничены 20%.

На рис. 3 видно, что на поверхности необлученных образцов располагаются следы полировки и микровыступы, возникшие в процессе подготовки поверхности образцов (рис. 3а). При плотности тока  $100 \text{ A/cm}^2$  происходит выглаживание поверхности с образованием размытых рисок и множества мелких кратеров (рис. 3б). Когда плотность тока достигает  $200 \text{ A/cm}^2$ , царапины и риски исчезают совсем, однако образуется несколько больших и глубоких кратеров на обработанной поверхности (рис. 3с). При обработке с высокими плотностями тока -  $300 \text{ A/cm}^2$  наблюдается однородная поверхность (рис. 3д).

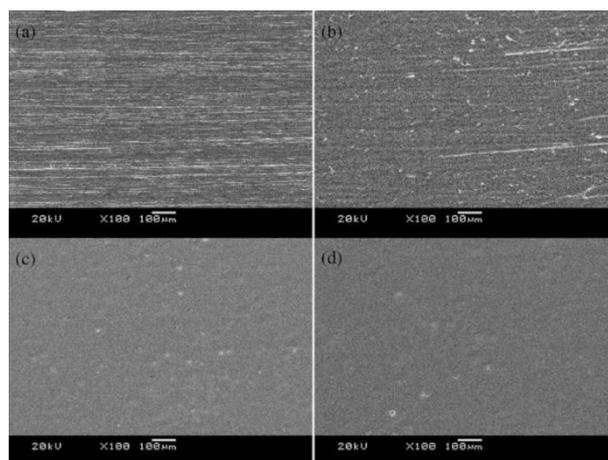


Рис. 3. СЭМ фотографии поверхностей исходных и облученных образцов из нержавеющей стали 316L, облученных при различной плотности ионного тока 10 импульсами: а - исходный; б -  $100 \text{ A/cm}^2$ ; с -  $200 \text{ A/cm}^2$ ; д -  $300 \text{ A/cm}^2$

Микротвердость облученных образцов на глубину до 200 мкм выше, чем микротвердость исходного образца (рис. 4).

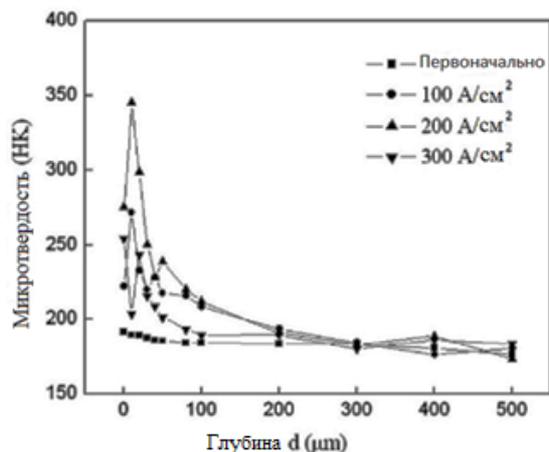


Рис. 4. Распределение микротвердости по глубине в образцах из нержавеющей стали 316L, облученных 10 импульсами МИП при различных плотностях тока

Степень упрочнения зависит от плотности тока МИП, максимум которой наблюдается при  $200 \text{ А/см}^2$ . Уменьшение микротвердости приповерхностного слоя при обработке с плотностью тока  $300 \text{ А/см}^2$  связано с большей глубиной плавления поверхности и абляцией при чрезмерной плотности тока.

Изменение износостойкости представлено на рис. 5. Облученные образцы показывают увеличение износостойкости, что связано с увеличением микротвердости.

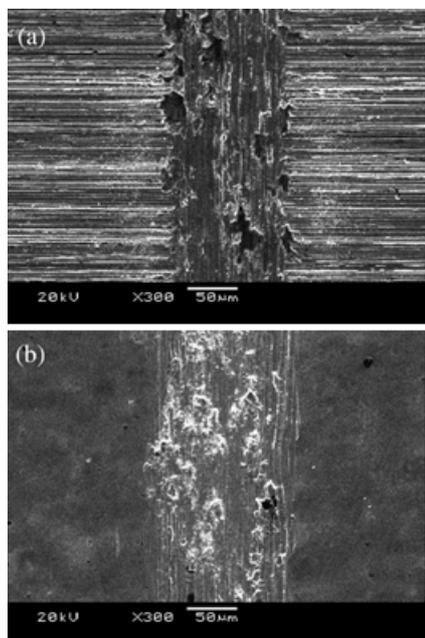


Рис. 5. Следы износа на поверхности образцов из нержавеющей стали 316L: а – исходный; б - облученный 10 импульсами при  $200 \text{ А/см}^2$

Распределение усталостной прочности образцов показано на рис. 6.

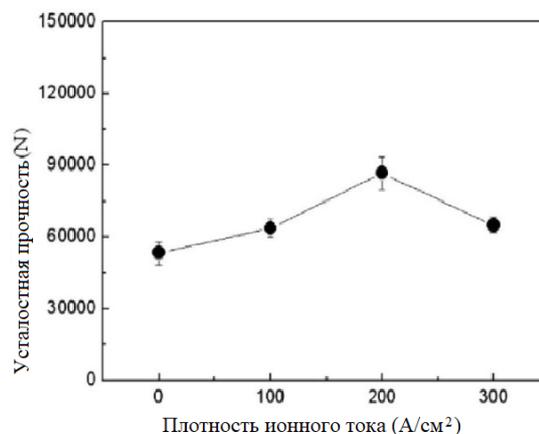


Рис. 6. Усталостная прочность для образцов из нержавеющей стали 316L, обработанных 10 импульсами МИП

Из рисунка видно, что улучшение усталостной прочности нержавеющей стали 316L зависит от плотности тока МИП. Образец, облученный 10 импульсами МИП с плотностью тока  $200 \text{ А/см}^2$ , показывает лучшую усталостную прочность.

Исследования, проведенные в работе [7], показывают, что полировочные следы исчезают вследствие плавления и абляции при повышении плотности тока. Исчезновение на поверхности царапин и образование кратеров свидетельствует о превышении температуры плавления стали 316L на поверхности при облучении МИП. Увеличение микротвердости приповерхностной области образцов, обработанных МИП, является следствием быстрого нагрева и охлаждения поверхности, а также действия термопластических напряжений вследствие действия высоких температурных градиентов. С увеличением плотности тока при облучении образца происходит более сильное выглаживание поверхности, что приводит к улучшению усталостной прочности образцов.

В работе [8] изучались структурные и фазовые изменения, происходящие в приповерхностных слоях предварительно закаленной быстрорежущей стали (БРС)  $W6Mo5Cr4V2$ , расплавленных мощным ионным пучком (МИП). Ионный пучок состоял в основном из ионов  $C^{n+}$  (70%) и  $H^+$  (30%). Параметры ионного пучка, используемого в эксперименте, следующие: плотность тока  $80 \text{ А/см}^2$ , ускоряющее напряжение 250 кВ, длительность импульса 70 нс и количество импульсов 1, 3 и 5, соответственно.

В результате обработки МИП на поверхности образца БРС возникают кратеры (рис. 7).

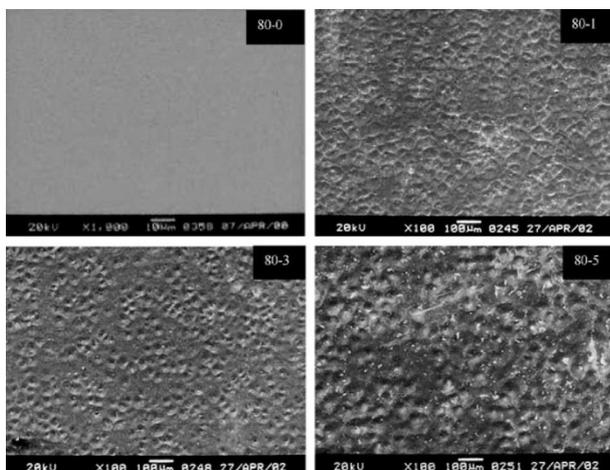


Рис. 7. СЭМ морфология поверхности образцов, облученных МИП (номер образца указан в правом верхнем углу каждого снимка)

Образец 80-1 – большое количество мелких кратеров с соединенными краями, образующими неперIODическую сетчатую топологию. Образец 80-3 - число кратеров меньше и они не соединены. На образце 80-5 кратеров (размер порядка 10 мкм и глубина порядка мкм) значительно меньше и их границы размазаны.

На рис. 8 показано увеличенное изображение образцов 80-1 и 80-5.

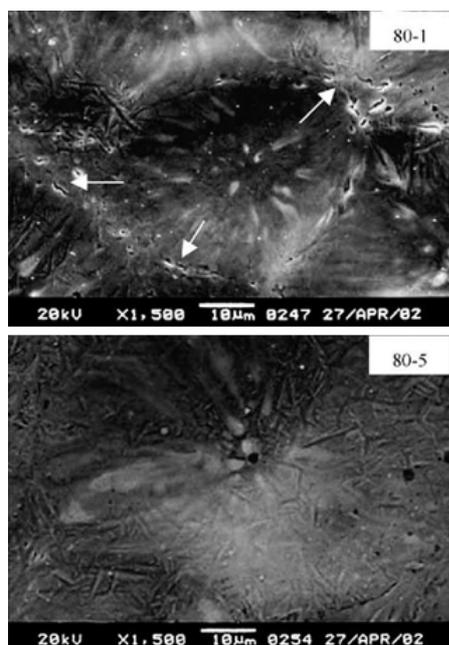


Рис. 8. Микротрещины, возникающие на поверхности образцов, облученных МИП

На образце 80-1 видно несколько микротрещин (указаны стрелками). На поверхности образца 80-5 произошло уменьшение микротрещин и окисление мартенсита. Формирование микротрещин – атрибут сверхскоростных термических процессов и ударной волны, возникающих в процессе воздействия ионного пучка. В свою очередь, облучение большим числом импульсов приводит к исчезновению микротрещин, образованных при разовом воздействии. Окисленный мартенсит формируется вследствие закалочного эффекта МИП. Электронной микроскопией и рентгеновской дифракцией было обнаружено, что после облучения МИП мартенсит приповерхностных слоев трансформируется в аустенит, также образуются остаточные напряжения. Аустенит, созданный МИП, может быть стабильным и в напряженном состоянии. Однако величина напряжений, особенно в приповерхностном слое, довольно низкая, так как аустенит обработанной поверхности образован из мартенсита при быстром охлаждении.

Износостойкость БРС определялась измерением глубины канавки. На рис. 9 показана кривая глубины износа как функции времени. В начале износа различия не наблюдается. После 60 минут испытаний можно видеть, что глубина канавки для образца 80-0 в 2,5 раза больше, чем для образца 80-5 и в 1,7 раза больше, чем для образца 80-3. Следовательно, можно сделать вывод, что износостойкость увеличивается вместе с увеличением количества импульсов.

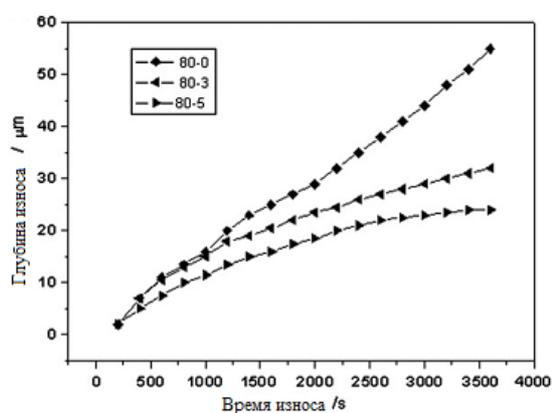


Рис. 9. Зависимость глубины износа БРС от времени

В работах [7], [8] обосновывается применение МИП для упрочнения твердосплавного режущего инструмента повышением его износостойкости. Более подробно повышение износостойкости рассматривается в работе [9]. Способ обработки поверхности режущего инстру-

мента основан на имплантации ионов Ti (с энергией  $E = 25-35$  кэВ и дозой ионов  $\Phi = 2 \cdot 10^{17} - 5 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>) и импульсном облучении мощным пучком ионов углерода C<sup>+</sup> и водорода H<sup>+</sup> (с энергией  $E = 300$  кэВ, плотностью тока в пределах 50 - 150 А/см<sup>2</sup>, дозой ионов  $\Phi = 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup>). За счет воздействия мощного ионного пучка осуществляется "перемешивание" имплантированных ионов, что ведет к образованию карбидных и оксидных фаз по типу TiC, TiO<sub>2</sub>.

Последовательным воздействием на твердосплавный режущий инструмент (например, из сплавов T15K6, BK8) ионами различной энергии осуществляется проникновение легирующих элементов на большую глубину. За счет образования твердосплавных хрупких карбидных зерен и сохранения пластичной кобальтовой прослойки достигается компромисс между хрупкими и пластичными свойствами твердого сплава.

Из рис. 10 видно, что износостойкость модифицированного слоя после дополнительного воздействия мощным импульсным пучком ионов (C<sup>+</sup>, H<sup>+</sup>) возрастает приблизительно в 6 раз.

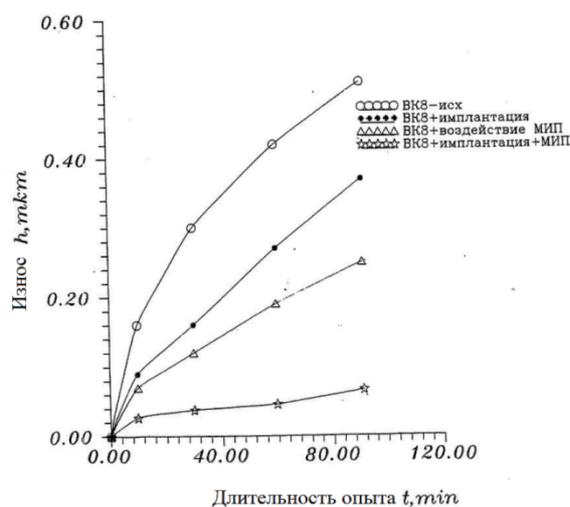


Рис. 10. Результаты сравнительных испытаний на износостойкость при резании стали марки 40Х твердосплавными пластинами ВК8

Проведенные в работе [9] исследования процесса резания показали, что в результате комбинированной обработки режущего инструмента снижается уровень адгезионного взаимодействия между режущим инструментом и обрабатываемым материалом. Исследования проводились по классическим схемам испытания на износостойкость при резании стали на различных скоростных режимах. Износ оцени-

вали по ширине фаски задней поверхности резца.

В работе [10] изучен способ модификации поверхностного слоя алюминия, меди и никеля, основанный на термомеханическом воздействии на поверхность образцов мощного ионного пучка наносекундной длительности. Характеристики МИП: состав 30% C<sup>+</sup> и 70% H<sup>+</sup> с энергией 300 КэВ, плотность тока 50-150 А/см<sup>2</sup>, три импульса длительностью 50 нс. Облучение поверхности алюминия осуществлялось тремя импульсами МИП с плотностью ионного тока 50 А/см<sup>2</sup>, меди - тремя импульсами МИП с плотностью ионного тока 50, 100 и 150 А/см<sup>2</sup> и никеля - тремя импульсами МИП с плотностью ионного тока 150 А/см<sup>2</sup>. Перед облучением МИП проводили диффузионный вакуумный отжиг в течении 2-2,5 часов при температуре 200°С (для алюминия), 350°С (для меди) и 600°С (для никеля) для устранения влияния наклепанного слоя, образовавшегося при механической подготовке образцов.

В результате такой обработки обеспечиваются формирование аксиальных кристаллографических текстур с осями <111> и <100> при рекристаллизации в алюминии, перекристаллизация в никеле и фрагментация в меди, вызванная распространением полей температур и напряжений при воздействии мощного ионного пучка; повышаются значения микротвердости в направлении <111> в алюминии на 40% (с 250 МПа до 350 МПа) на глубине ~9 мкм, в меди на 17% (с 725 МПа до 875 МПа) на глубине ~8 мкм и никеле на 5% (с 1477 МПа до 1551 МПа) на глубине ~7 мкм.

Наиболее эффективным для алюминия оказалось облучение мощным ионным пучком с плотностью ионного тока 50 А/см<sup>2</sup> тремя импульсами; для меди - облучение МИП с плотностью ионного тока 50, 100 и 150 А/см<sup>2</sup> тремя импульсами, для никеля - облучение МИП с плотностью ионного тока 150 А/см<sup>2</sup> тремя импульсами.

## Заключение

Рассмотрено одно из современных направлений развития физики твердого тела – воздействие мощных ионных пучков на твердые материалы. Показаны основы применения мощного ионного пучка. На широком классе металлов и сплавов продемонстрировано реальное улучшение таких эксплуатационных характеристик, как усталостная прочность, износостойкость,

повышение значений микротвердости, выглаживание и очищение поверхности, снижение уровня адгезионного взаимодействия между режущим инструментом и обрабатываемым материалом. Изучено влияние плотности тока и количества импульсов на поверхность образцов.

Обосновано практическое применение МИП.

#### Литература

1. Ремнев Г.Е. Модификация материалов с использованием мощных ионных пучков // Известия ТПУ. 2000. №2. С.59-70
2. Ремнев Г.Е., Погребняк А.Д. Применение мощных ионных пучков для технологических целей // Новости науки и техники. Серия: Новые материалы, технология их производства и обработки. М.: ВИНТИ, 1990. Вып.2. 30с.
3. Применение обработки мощными ионными пучками для ремонта и очистки изделий /В.А. Шулов, Н.А. Ночевная и др. //Письма в ЖТФ. 1991. Т.17. Вып.17. С. 38-42.
4. Патент РФ №2009269. Способ восстановления эксплуатационных свойств деталей машин. Зубарев Г.И.,

Исаков И.Ф., Ночевная Н.А., Ремнев Г.Е. Приоритет: 10.02.92, БИ, 1994, №5.

5. Патент РФ №2094521. Способ восстановления эксплуатационных свойств деталей из жаропрочных сплавов. Ночевная Н.А., Опекунов М.С., Ремнев Г.Е., Шулов В.А. Приоритет: 27.10.1997

6. Основы и применение модификации материалов мощными ионными пучками/ S.Z. Hao, Y. Qin, X.X. Mei, B. Gao, J.X. Zuo, Q.F. Guan, C. Dong, Q.Y. Zhang// Surface & Coatings Technology. 2007. Vol. 201. Pp.8588-8595. 11с.

7. Wang X., Lei M.K., Zhang J.S. Поверхностная модификация нержавеющей стали 316L мощным ионным пучком // Surface & Coatings Technology. 2007. Vol. 201. Pp. 5884-5890. 7с.

8. Микроструктура и износостойкость быстрорежущей стали, обработанной с применением мощного ионного пучка/ X.X. Mei, S.Z. Hao, T.C. Ma, Y.M. Wang, Z.M. Liu // Nuclear Instruments and Method in Physics Research B. 2005. Vol.239. Pp.152-158. 3с.

9. Патент РФ №2119551. Способ обработки твердосплавного режущего инструмента. Геринг Г.И., Полещенко К.Н., Поворознок С.Н., Орлов П.В. Приоритет: 27.09.1998

10. Патент РФ № 2328548. Способы модификации поверхностного слоя алюминия, меди и никеля. Панова Т.В., Блинов В.И., Ковивчак В.С. Приоритет: 10.07.2008. 100с.

#### Информация об авторах

**Туришев Максим Юрьевич** – ВГТУ, студент кафедры «Ракетные двигатели», Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: [turishchevm@mail.ru](mailto:turishchevm@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5303-9000>

**Тишанинов Юрий Алексеевич** – ВГТУ, студент кафедры «Ракетные двигатели», Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: [jura1302@mail.ru](mailto:jura1302@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7303-9278>

**Горожанкина Ольга Владимировна** – ВГТУ, ст. преподаватель кафедры «Материаловедение и физика металлов», Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: [winter.07@mail.ru](mailto:winter.07@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3874-4630>

Поступила 23.11.2017; принята к публикации 23.03.2018

## PROCESSING OF METAL ENGINEERING PRODUCTS WITH POWERFUL ION BEAMS

**M.Yu. Turishchev, Yu.A. Tishaninov, O.V. Gorozhankina**

**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** this article is devoted to the practical use of high-power ion beams in modern industry. One of the modern trends in the development of solid state physics is considered: the effect of high-power ion beams on solid materials. The results of investigation of beam-erosion treatment and hardening of products using high-power ion beams are presented. The results obtained in various research centers and fixed by the patents of the Russian Federation demonstrate the wide possibilities of processing materials and improving the performance characteristics of products made from them. Increasing the strength of products (increasing the service life) under the influence of powerful ion beams is based on structural changes in the surface layer. The possibility of effective use of powerful ion beams for cleaning the surface of products is shown, including as an intermediate technological treatment of the surface of parts before application of coatings. The article demonstrates a real improvement in such performance characteristics as fatigue strength, wear resistance, increase in microhardness, smoothing of the surface, a decrease in the level of adhesion between the cutting tool and the material to be treated, and after the preliminary treatment of products with powerful ion beams, the improvement of adhesion of wear-resistant coating for a wide class of metals, alloys and products

**Key words:** high-power ion beams, surface layer, hardening

References

1. Remnev G.E. "Modification of materials using high-power ion beams", *The bulletin of TPU (Izvestia TPU)*, 2000, no. 2, pp.59-70.
2. Remnev G.E., Pogrebnyak A.D. "Application of powerful ion beams for technological purposes", *News of science and technology, Series: New materials, the technology of their production and processing (Novosti nauki i tekhniki. Seriya: Novye materialy, tekhnologiya ikh proizvodstva i obrabotki)*, Moscow, VINITI, 1990, pp. 2-30.
3. Shulov V.A., Nochevnaya N.A. "Application processing with powerful ion beams for repair and cleaning products", *Letters to the JTF (Pis'ma v ZhTF)*, 1991, vol.17, pp. 38-42.
4. Zubarev G.I., Isakov I.F., Nochevnaya N.A., Remnev G.E. "The way to restore the operational properties of machine parts" ("Sposob vosstanovleniya ekspluatatsionnykh svoystv detaley mashin"), Patent RF 2009269, 1994
5. Nochevnaya N.A., Opekunov M.S., Remnev G.E., Shulov V.A. "Method for restoring the operational properties of parts made of heat-resistant alloys" ("Sposob vosstanovleniya ekspluatatsionnykh svoystv detaley iz zharo-prochnykh splavov"), Patent RF 2094521, 1997
6. Hao S.Z., Qin Y., Mei X.X., Gao B., Zuo J.X., Guan Q.F., Dong C., Zhang Q.Y. "Fundamentals and applications of material modification by intense pulsed beams", *Surface & Coatings Technology*, 2007, vol. 201 pp. 8588-8595.
7. Wang X., Lei M.K., Zhang J.S. "Surface modification of 316L stainless steel with high-intensity pulsed ion beams", *Surface & Coatings Technology*, 2007, vol. 201, pp. 5884-5890.
8. Mei X.X., Hao S.Z., Ma T.C., Wang Y.M., Liu Z.M. "Microstructure and wear resistance of high-speed steel treated with a powerful ion beam", *Nuclear Instruments and Method in Physics Research B*, 2005, vol. 239, 152-158.
9. Gering G.I., Poleshenko K.N., Povoroznyuk S.N., Orlov P.V. "Methods of machining metal-cutting tools made of hard alloy" ("Sposob obrabotki tverdospлавnogo rezhushchego instrumenta"), Patent RF 2119551, 1998
10. Panova T.V., Blinov V.I., Kovivchak V.S. "Methods for modifying the surface layer of aluminum, copper and nickel" ("Sposoby modifikatsii poverkhnostnogo sloya alyuminiya, medi i nikelya"), Patent RF 2328548, 2008

Submitted 23.11.2017; revised 23.03.2018

Information about the authors

**Maksim Yu. Turishchev**, Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation (14 Moskovskiy prospect, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: [turishchevm@mail.ru](mailto:turishchevm@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5303-9000>  
**Yuriy A. Tishaninov**, Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation (14 Moskovskiy prospect, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: [jura1302@mail.ru](mailto:jura1302@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7303-9278>  
**Ol'ga V. Gorozhankina**, Assistant Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation (14 Moskovskiy prospect, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: [winter.07@mail.ru](mailto:winter.07@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3874-4630>

УДК 538.953

## ВЛИЯНИЕ ОТЖИГОВ НА СТРУКТУРУ НАНОКОМПОЗИТОВ Ni-Zr(Y)O<sub>2</sub>, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ РЕАКТИВНОГО ВЧ-МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ

© 2018 М.С. Филатов, О.В. Стогней

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** с помощью магнетронного высокочастотного (ВЧ) реактивного напыления были получены две группы наноструктурированных композитов Ni<sub>x</sub>-(Zr(Y)O<sub>2</sub>)<sub>100-x</sub>. В процессе напыления давление реактивного газа (кислорода) в первой группе составило 0.01 Па. Такой режим напыления позволил получить двухфазные композиты, включающие в себя металлическую фазу (Ni) и стабилизированную керамическую фазу (Zr(Y)O<sub>2</sub>). Во втором случае давление реактивного газа O<sub>2</sub> в процессе напыления составило 0.04 Па. В этом случае в процессе распыления металлических мишеней (Ni и Zr<sub>92</sub>Y<sub>8</sub>) происходило окислений обоих металлов, что привело к образованию двухфазного композита, представляющего собой оксид никеля и стабилизированный диоксид циркония. С помощью рентгено-дифракционного анализа исследована структура полученных композитов в зависимости от содержания металлической фазы никеля и от давления кислорода в процессе напыления. Для исследования термической стабильности наноструктурированных композитов были проведены отжиги в воздушной атмосфере при температуре 700 °С. После отжига при температуре 700 °С в композитах, полученных в режиме с повышенным давлением кислорода (0.04 Па), полностью отсутствуют фазовые превращения, что говорит о хорошей термоустойчивости структуры NiO<sub>x</sub>-(Zr(Y)O<sub>2</sub>)<sub>100-x</sub>.

**Ключевые слова:** наноструктурированный композит, термостойкость, рентгено-дифракционный анализ, термический отжиг, магнетронное напыление, реактивный газ, структурная стабильность, стехиометрия

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-42-360778 p\_a)

### Введение

Для защиты и увеличения рабочего ресурса жаропрочных сплавов на основе никеля на их поверхность наносят специальные термобарьерные покрытия. К термобарьерным покрытиям предъявляется ряд требований, в число которых входит низкая теплопроводность, стабильность при высоких температурах, высокая долговечность, коррозионная стойкость, механическая стойкость, химическая инертность и т. п. [1]. В этой связи ZrO<sub>2</sub> является наиболее подходящим материалом для создания термобарьерных покрытий. Однако в чистом виде ZrO<sub>2</sub> обладает низкой термостойкостью из-за обратимого фазового перехода при температуре 1197 °С, плохой адгезией и кроме этого диоксид циркония способен проводить ионы кислорода, то есть не способен защитить поверхность от окисления [2]. Общим подходом для улучшения механических и термомеханических свойств данного материала является стабилизация тетрагональной модификации диоксида циркония и снижение его дефектности. Для уменьшения степени дефектности покрытий необходимо использовать отличные от «традиционных» (плазменное напыление, электро-

осаждение и т. п.) методы нанесения покрытий. Например, с помощью вакуумных ионно-плазменных технологий можно получать гетерогенные покрытия в наноструктурированном состоянии с высокой прочностью и износостойкостью [3]. В данной работе с помощью различных режимов реактивного ВЧ-магнетронного напыления на основе стабилизированного диоксида были получены композиты Ni<sub>x</sub>-(Zr(Y)O<sub>2</sub>)<sub>100-x</sub> с разным содержанием металлической фазы никеля и исследована их термическая стабильность.

### Методика

Исследованные образцы были получены с помощью реактивного ВЧ-магнетронного распыления металлических мишеней Ni и Zr<sub>92</sub>Y<sub>8</sub>. Распыление мишеней происходило одновременно с помощью двух независимых ВЧ-магнетронов. Изменение концентрации металлической фазы в формируемых покрытиях осуществлялось за счет вариации напряжения, подаваемого на магнетрон с никелевой мишенью. Мощность магнетрона, распыляющего мишень Zr<sub>92</sub>Y<sub>8</sub>, была постоянной и составляла 600 Вт, мощность магнетрона, распыляющего

никель, изменялась в диапазоне от 100 до 500 Вт. Частота ВЧ сигнала составила 13.56 МГц. В состав циркониевой мишени входил иттрий, что необходимо для формирования стабилизированной высокотемпературной модификации диоксида циркония (то есть оксида с тетрагональной модификацией [4]). Стабилизация высокотемпературных фаз диоксида циркония позволяет улучшить термостойкость и увеличивает рабочий ресурс защитного термобарьерного покрытия.

Были получены две группы композитных образцов с одинаковым концентрационным соотношением Ni и Zr, но с разным содержанием кислорода. Давление рабочего газа Ar во всех случаях было равным 1 Па, в то время как давление реактивного газа O<sub>2</sub> для первой группы композитов составляло 0.01 Па, для второй группы композитов было равным 0.04 Па.

В качестве подложек для формирования покрытий использовались стеклянные пластины с аморфной структурой. Данное обстоятельство существенно упрощает анализ результатов рентгеновской дифракции, поскольку аморфная подложка не даёт дифракционных максимумов. Исследование структуры композитов проводилось с помощью рентгено-дифракционного анализа на дифрактометре D2 PHASER фирмы BRUKER в CuK $\alpha$  излучении в геометрии съемки Брега - Брентано. Состав полученных пленок был определён с помощью электронно-зондового микроанализа, на растровом электронном микроскопе JED – 2300 с энергией электронного пучка 5 кВ. Толщина композитных покрытий, измеренная с помощью интерферометра МИИ – 4, находилась в интервале значений от 2.8 до 3.2 мкм.

Термические отжиги покрытий проводились в муфельной печи в воздушной атмосфере при температуре 700 °С. Время отжига во всех случаях было одинаковым и составляло 1 час.

## Результаты

Дифрактограммы композитов, полученных с помощью магнетронного напыления в режиме с пониженным давлением кислорода (0.01 Па) представлены на рис. 1. В композите, содержащем 15 ат. % Ni, на рентгенограмме присутствуют дифракционные пики, принадлежащие высокотемпературной тетрагональной модификации диоксида циркония. Пики от других фаз при такой концентрации металла отсутствуют. В области Брэгговских углов 28° - 38° можно

выделить аморфное гало, которое, по всей видимости, получено от мелкодисперсной части сформированного покрытия. Предположительно это нанозерна никеля, которого в покрытии 15 ат. %. Гало от подложки (стекла) располагается в области меньших углов (20° – 28°), поэтому оно не может быть причиной указанного усиления интенсивности.

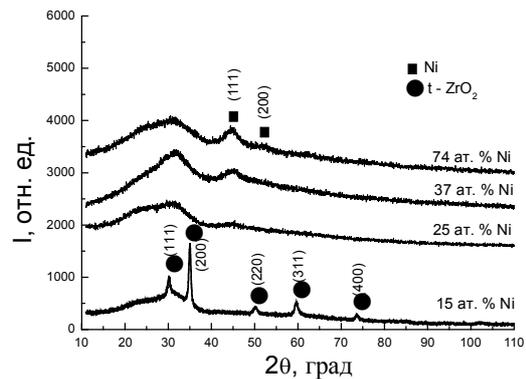


Рис. 1. Рентгенограммы композитов Ni<sub>x</sub>(ZrO<sub>2</sub>)<sub>100-x</sub>, полученных с помощью реактивного ВЧ-магнетронного напыления, в режиме с пониженным давлением кислорода (P<sub>O<sub>2</sub></sub> = 0,01 Па)

Расчет доли кристалличности сформированной структуры, проведенный с помощью лицензионного программного пакета DiffracEVA, показал, что фиксируемая рентгенофазовым методом кристаллическая доля пленки составляет всего 31.5 %.

Используя формулу Шеррера [5], на основе данных, полученных с помощью рентгеноструктурного анализа, были рассчитаны средние размеры кристаллитов диоксида циркония. Для композита Ni<sub>15</sub>(Zr(Y)O<sub>2</sub>)<sub>85</sub> средний размер кристаллитов составил 14 нм. Предположительно, ограничение роста кристаллических зерен ZrO<sub>2</sub> в данном случае обусловлено внедрением в керамическую матрицу наноструктурированных никелевых частиц. Несмотря на то, что при 15 ат. % никеля на рентгенограмме не содержится пиков от никеля (отсутствие пиков возможно при одновременно малом размере кристаллитов и малом содержании металла), предположительно именно никелевые частицы выступают в роли барьерного ограничения роста кристаллитов диоксида циркония.

В композитах с более высокой концентрацией металлической фазы (в диапазоне 25 – 74 ат. % Ni) наблюдается отсутствие дифракционных пиков от диоксида циркония – диоксидная фаза не идентифицируется. Самое удивитель-

ное то, что дифрактограмма композита  $Ni_{25}(Zr(Y)O_2)_{75}$  имеет вид рентгеноаморфной, то есть не содержит дифракционных максимумов, а степень кристалличности составила всего 11%. По всей видимости, при такой концентрации никеля размеры фазовых включений (как никеля, так и диоксида циркония) чрезвычайно малы и не могут быть идентифицированы с помощью рентгеновского излучения. При дальнейшем увеличении концентрации никеля (начиная с 37 ат. % и до 74 ат. %) на рентгенограммах появляются размытые дифракционные пики, соответствующие кубической модификации никеля, что свидетельствует о росте средних размеров никелевых гранул. Численные оценки показывают, что средний размер кристаллических частиц в этом диапазоне составил 3.7 нм. Также в области  $30 - 35^\circ$  можно наблюдать сильно размытое гало, которое, по всей видимости, принадлежит наноструктурированной фазе оксида циркония.

Таким образом, с помощью магнетронного ВЧ реактивного напыления в условиях подачи реактивного газа  $O_2$  в количестве 0.01 Па происходит формирование двухфазных наноструктурированных композитов металл-керамика  $Ni_x(Zr(Y)O_2)_{100-x}$ .

Для исследования термической стабильности наноструктурированных композитов был проведен термический отжиг в течение 1 часа при температуре  $700^\circ C$  в воздушной среде. Результаты рентгено-дифракционного анализа композитов, прошедших отжиг, представлены на рис. 2.

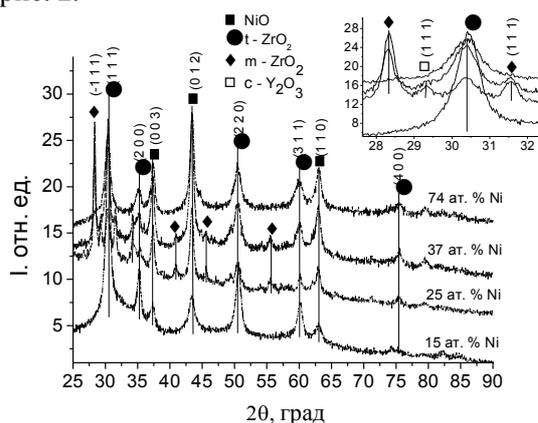


Рис. 2. Рентгенограммы композитов  $Ni_x(ZrO_2)_{100-x}$  полученных с помощью реактивного ВЧ-магнетронного напыления с пониженным давлением кислорода ( $P_{O_2}=0,01$  Па) после отжига при температуре  $700^\circ C$

Очевидно, что после отжига во всем концентрационном интервале наблюдается появление большого числа новых дифракционных пиков. В области 15 ат. % никеля кроме ре-

флексов от тетрагонального диоксида циркония появились пики, соответствующие кубическому оксиду никеля NiO (рис. 2). Средний размер кристаллитов этой фазы, рассчитанный с помощью формулы Шеррера [5], составил 11 нм. Размер кристаллитов  $ZrO_2$  в композите  $Ni_{15}(Zr(Y)O_2)_{85}$  после отжига не изменился и составил 14 нм. Такой результат подтверждает предположение об ограничении роста кристаллических зерен диоксида частицами никеля. Появление пиков от кубического оксида никеля обусловлено процессом окисления металлической фазы в процессе отжига и образованием более крупных частиц (NiO). Количественный фазовый анализ покрытия  $Ni_{15}(Zr(Y)O_2)_{85}$ , подвергнутого отжигу при температуре  $700^\circ C$ , показал наличие в этом композите 76 %  $ZrO_2$  и 24 % NiO.

Отжиг композитов, находящихся в интервале концентраций никеля от 25 ат. % до 37 ат. %, привел к более радикальным изменениям в структуре. Во-первых, в композитах  $Ni_{25}(Zr(Y)O_2)_{75}$  и  $Ni_{37}(Zr(Y)O_2)_{63}$  наблюдается частичный переход (распад) высокотемпературной тетрагональной фазы диоксида циркония в стабильную моноклинную модификацию с выделением стабилизирующей добавки в виде отдельной фазы кубического оксида иттрия  $Y_2O_3$  (рис. 2). Во-вторых, кроме оксида циркония и оксида иттрия на рентгенограммах от композитов  $Ni_{25}(Zr(Y)O_2)_{75}$  и  $Ni_{37}(Zr(Y)O_2)_{63}$  появляются дифракционные пики от кубического оксида никеля. Средний размер кристаллитов в композите  $Ni_{25}(Zr(Y)O_2)_{75}$  для m- $ZrO_2$  составил 25 нм, для t- $ZrO_2$  20 нм, для  $Y_2O_3$  - 29 нм, а для NiO - 14 нм. На рис. 3 представлена диаграмма с количественным фазовым соотношением оксидов. Средний размер кристаллитов в композите  $Ni_{37}(Zr(Y)O_2)_{63}$  для m- $ZrO_2$  составил 32 нм, для t- $ZrO_2$  - 17 нм, для  $Y_2O_3$  - 13 нм, а для NiO - 15 нм. На рис. 4 представлена диаграмма с количественным фазовым соотношением оксидов для композита с 37 ат. % Ni.

Появление большого количества моноклинной фазы, сопровождающегося выделением стабилизирующей фазы оксида иттрия, можно объяснить исходя из ограничения роста кристаллических зерен оксида циркония частицами никеля. В процессе отжига естественным процессом является увеличение размеров зерен. Так как рост кристаллитов диоксида циркония ограничен включениями никеля, в процессе термического воздействия в зернах  $ZrO_2$  возникают деформационные напряжения, которые

служат катализатором фазового перехода  $t \rightarrow m$  и выделения в отдельную фазу оксида иттрия.

Фазовый состав композитов  $Ni_{74}(Zr(Y)O_2)_{26}$ , прошедших термический отжиг, такой же, как и в случае композита с минимальным содержанием металлической фазы (15 ат. % Ni): идентифицируются пики от двух фаз.

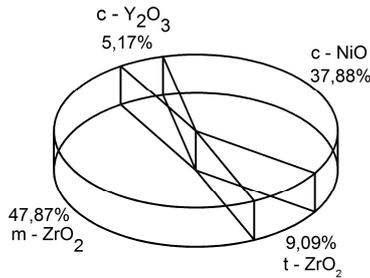


Рис. 3. Диаграмма результатов количественного фазового анализа наноструктурированного композита  $Ni_{25}(Zr(Y)O_2)_{75}$  после отжига в воздушной среде при температуре  $700\text{ }^\circ\text{C}$

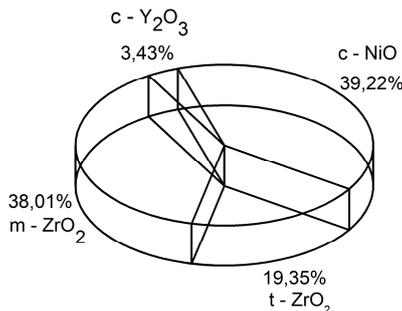


Рис. 4. Диаграмма результатов количественного фазового анализа наноструктурированного композита  $Ni_{37}(Zr(Y)O_2)_{63}$  после отжига в воздушной среде при температуре  $700\text{ }^\circ\text{C}$

Во-первых, высокотемпературная тетрагональная модификация диоксида циркония (33.63 %), во-вторых, кубический оксид никеля (66.37 %), образовавшийся в процессе окисления во время отжига. В данном случае средний размер кристаллитов  $ZrO_2$  составил 7 нм, NiO - 11 нм. Отличие от композита  $Ni_{15}(Zr(Y)O_2)_{85}$  заключается лишь в соотношении фаз – при большей концентрации никеля в композите объемная доля NiO также выше.

Таким образом, композиты  $Ni_x(Zr(Y)O_2)_{100-x}$ , полученные с помощью реактивного ВЧ-магнетронного напыления в режиме с пониженным давлением кислорода, после термического воздействия при температуре  $700\text{ }^\circ\text{C}$  не сохраняют своего исходного структурного состояния. В процессе отжига происходит окисление фазы никеля и на рентгенограммах наблюдается образование оксида никеля (рис.

2). Кроме этого, в области составов от 25 ат. % до 37 ат. % Ni наблюдается образование низкотемпературной модификации диоксида циркония, сопровождающееся выделением в отдельную фазу оксида иттрия. Однако несмотря на значительные структурные изменения, разрушения наноструктурированного состояния не происходит, средний размер кристаллитов в композитах даже после термического воздействия лежит в диапазоне от 7 нм до 30 нм.

Известно, что при реактивном напылении покрытий парциальное давление химически активного газа существенным образом может влиять как на морфологию, так и на фазовый состав формируемого материала. В этой связи проведено исследование влияния повышенного давления кислорода на структуру композитов  $Ni_x(Zr(Y)O_2)_{100-x}$ , получаемых с помощью реактивного ВЧ-магнетронного напыления. Были получены четыре композита с таким же концентрационным соотношением металлов (Ni к Zr), как и в первой группе, но при более высоком парциальном давлении кислорода. В данном случае оно составило 0.04 Па, то есть в четыре раза больше, чем в первой группе образцов. Рентгенограммы, полученные от композитов этой группы, представлены на рис. 5.

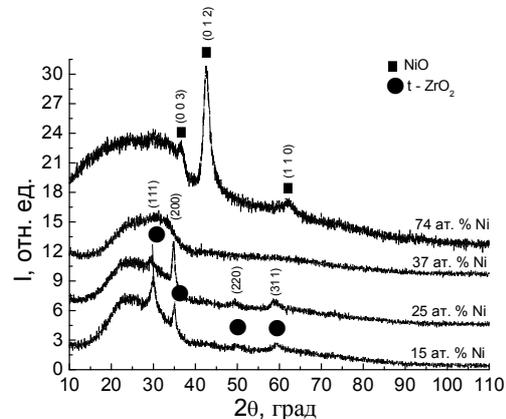


Рис. 5. Рентгенограммы композитов  $Ni_x(ZrO_2)_{100-x}$ , полученных с помощью реактивного ВЧ-магнетронного напыления, в режиме с высоким парциальным давлением кислорода ( $P_{O_2} = 0,04\text{ Па}$ )

Как следует из приведённых данных, в условиях повышенного давления кислорода тетрагональная фаза, в отличие от предыдущего случая (рис. 1), наблюдается в более широком концентрационном интервале от 15 ат. % до 25 ат. % Ni. При этом пиков от никеля в этом концентрационном диапазоне не наблюдается. Средний размер кристаллитов диоксида циркония у композита составил 9.5 нм - 10 нм.

При этом степень кристалличности представленных композитов не превышает 20 %, что предположительно говорит о высоком содержании мелкодисперсных компонентов с размером кристаллитов менее 2 нм.

Увеличение концентрации никеля до 37 ат. % приводит к образованию рентгеноаморфной структуры (рис. 5). В данном случае на рентгенограмме полностью отсутствуют кристаллические пики, а степень кристалличности составляет всего 19 %. По всей видимости, уменьшение содержания керамической фазы и одновременно с этим увеличение содержания никелевой фазы приводят к постепенному уменьшению кристаллитов  $ZrO_2$  вплоть до предела разрешающей способности рентгенодифракционного фазового анализа. Напротив, постепенное увеличение содержания металлической фазы приводит к тому, что при концентрации 74 ат. % Ni на рентгенограмме появляются дифракционные пики, принадлежащие кубической модификации оксида никеля. Средний размер кристаллитов NiO в этом случае составил 5 нм, степень кристалличности 25 %. Такой результат говорит о том, что в процессе реактивного ВЧ-магнетронного напыления с повышенным давлением кислорода ( $P_{O_2} = 0.04$  Па) происходит окисление не только циркония, но и никеля. Поэтому в данном случае стоит говорить о получении композита, состоящего из двух оксидов  $NiO_x$  и  $(Zr(Y)O_2)_{100-x}$ . Стоит также отметить, что средний размер кристаллитов  $t-ZrO_2$  в данном случае меньше, чем у композитов, полученных в режиме с пониженным давлением кислорода ( $P_{O_2} = 0.01$  Па).

Состав \ Режим	15 ат. % Ni	25 ат. % Ni	37 ат. % Ni	74 ат. % Ni	Фаза
$P_{O_2}=0.01$ Па исходные	14 нм	-	- 3 нм	- 4.5 нм	$t-ZrO_2$ с-Ni
$P_{O_2}=0.01$ Па отж. 700 °С	14 нм 12 нм	20 нм 14 нм	17 нм 15 нм	7 нм 11 нм	$t-ZrO_2$ с-NiO
$P_{O_2}=0.04$ Па исходные	9.5 нм	10 нм	-	- 5 нм	$t-ZrO_2$ с-NiO
$P_{O_2}=0.04$ Па отж. 700 °С	8 нм	9 нм	-	- 6 нм	$t-ZrO_2$ с-NiO

В таблице представлены средние значения размеров кристаллитов тетрагонального  $ZrO_2$  и кубического NiO в зависимости от режима напыления, термообработки и состава.

В отличие от композитов первой группы структура композитов, исходно содержащих два оксида, совершенно не изменилась после отжига, проведенных при температуре 700 °С в воздушной среде (рис. 6). При небольшой концентрации никеля (15 и 25 ат. %) в композитах идентифицируется только нанодисперсная фаза  $ZrO_2$ , а при 73 ат. % Ni фиксируются пики от оксида никеля.

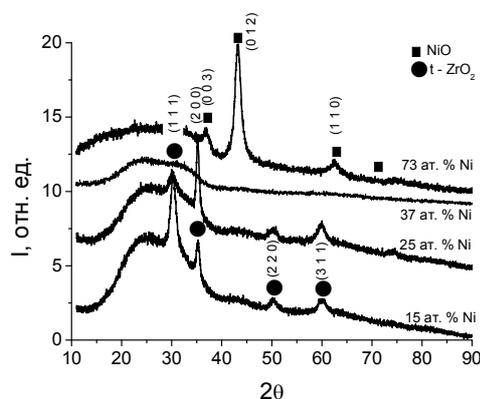


Рис. 6. Рентгенограммы композитов  $NiO_x(ZrO_2)_{100-x}$ , полученных с помощью реактивного ВЧ-магнетронного напыления с с высоким парциальным давлением кислорода ( $P_{O_2}=0,04$  Па) после отжига при температуре 700°С

Самое удивительное заключается в том, что отжиг не приводит к формированию крупнозернистой структуры в композите с рентгеноаморфной структурой (композит с 37 ат. % Ni, см. рис. 6).

Таким образом, композиты  $NiO_x(ZrO_2)_{100-x}$ , в составе которых изначально при получении сформировался оксид никеля, обладают более высокой структурной стабильностью при температуре 700 °С по сравнению с композитами  $Ni_x-(ZrO_2)_{100-x}$ . Также стоит отметить, что в обоих случаях термическая обработка не приводит к разрушению наноструктурного состояния.

### Выводы

Установлено, что в процессе реактивного ВЧ-магнетронного напыления в режиме с пониженным давлением кислорода ( $P_{O_2} = 0.01$  Па) происходит формирование двухфазных наноструктурированных композитов металл-керамика  $Ni_x(Zr(Y)O_2)_{100-x}$ .

Композиты  $Ni_x(Zr(Y)O_2)_{100-x}$ , полученные с помощью реактивного ВЧ-магнетронного

напыления в режиме с пониженным давлением кислорода, после термического воздействия при температуре 700 °С не сохраняют исходного фазового состояния. В процессе отжига происходит окисление металлической фазы и на рентгенограммах наблюдается образование оксида никеля. Кроме этого, в области от 25 ат. % до 37 ат. % Ni наблюдается образование низкотемпературной модификации диоксида циркония сопровождающееся выделением в отдельную фазу оксида иттрия. Однако несмотря на значительные структурные изменения, разрушения наноструктурного состояния не происходит, средний размер кристаллитов в композитах даже после термического воздействия находится в диапазоне от 7 нм до 30 нм.

Установлено, что в процессе реактивного ВЧ-магнетронного напыления с повышенным давлением кислорода ( $P_{O_2} = 0.04$  Па) формируются двухфазные композиты  $NiO_x(Zr(Y)O_2)_{100-x}$ . Средний размер кристаллитов  $t - ZrO_2$  в данном случае меньше, чем у композитов, полученных в режиме с пониженным давлением кислорода.

Установлено, что по сравнению с композитами, полученными в режиме с  $P_{O_2} = 0.01$  Па,

$NiO_x(ZrO_2)_{100-x}$  обладает более высокой структурной стабильностью при температуре 700 °С во всем концентрационном интервале (от 15 ат. % Ni до 74 ат. % Ni).

#### Литература

1. Мовчан Б.А., Малашенко И.С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. Киев: Наука думка, 1983. 232 с.
2. Матренин С.В., Слосман А.И. Техническая керамика: учеб. пособие. Томск: ТПУ, 2004. 75 с.
3. Donald M. Processing: film formation, adhesion, surface preparation and contamination control // Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD). Westwood: Noyes Publications. 1998
4. Валухов С.Г., Стогней О.В., Филатов М.С. Влияние условий магнетронного напыления на структуру жаростойких наноструктурированных покрытий // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. №11. С. 97-105
5. Improvement of adhesion and barrier properties of biomedical stainless steel by deposition of YSZ coatings using RF magnetron sputtering/ Z.E. Sánchez-Hernández, M.A. Domínguez-Crespo, A.M. Torres-Huerta, E. Onofre-Bustamante, J. Andraca Adamec, H. Dorantes-Rosales // Materials characterization. 2014. V. 91. P.50 – 57

Поступила 30.01.2018; принята к публикации 27.03.2018

#### Информация об авторах

**Филатов Максим Сергеевич** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект 14), e-mail: [36nord36@mail.ru](mailto:36nord36@mail.ru)

**Стогней Олег Владимирович** – д-р физ.-мат. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект 14), e-mail: [sto.sci.vrn@gmail.com](mailto:sto.sci.vrn@gmail.com), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2464-8376>

### THE EFFECT OF ANNEALING ON THE STRUCTURE OF Ni-Zr(Y)O<sub>2</sub> NANOCOMPOSITES, OBTAINED BY THE REACTIVE HF-MAGNETRON SPUTTERING

M.S. Filatov, O.V. Stogney

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** two groups of nanostructured  $Ni_x - YSZ_{100-x}$  composites were obtained with the help of magnetron high-frequency (HF) reactive sputtering. During the spraying process, the pressure of the reactive gas (oxygen) in the first group was 0.01 Pa. This mode of sputtering made it possible to obtain two-phase composites including a metallic phase (Ni) and stabilized ceramic phase ( $Zr(Y)O_2$ ). In the second case, the pressure of the reactive gas  $O_2$  during the sputtering process was 0.04 Pa. In this case, during the spraying of metal targets (Ni and  $Zr_{92}Y_8$ ), both metals were oxidized, which resulted in the formation of a two-phase composite consisting of nickel oxide and stabilized zirconium dioxide. With the help of X-ray diffraction analysis, the structure of the resulting composites was studied depending on the content of the nickel metal phase and on the pressure of oxygen during the sputtering process. An investigation of the thermal stability of nanostructured composites led to annealing in an air atmosphere at 700 °C. After annealing at a temperature of 700 °C, in composites obtained in the regime with an increased oxygen pressure (0.04 Pa), phase transitions are completely absent, which indicates a good thermal stability of the structure  $NiO_x-(Zr(Y)O_2)_{100-x}$ .

**Key words:** nanostructure composite, heat resistance, X-ray diffraction analysis, thermal annealing, magnetron sputtering, reactive gas, structural stability, stoichiometry

**Acknowledgements:** The work was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 16-42-360778 p\_a)

### References

1. Movchan B.A., Malashenko I.S. "Heat-resistant coatings deposited in vacuum" ("Zharostoykiye pokrytiya osozhdayemye v vakuume"), Kiev, Nauka Dumka, 1983, 232 p.
2. Matrenin S.V., Slosman A.I. "Technical ceramics. Manual" ("Tekhnicheskaya keramika Uchebnoe posobie"), Tomsk, TPU, 2004, 75 p.
3. Donald M. "Processing: film formation, adhesion, surface preparation and contamination control", *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD)*, Westwood, Noyes Publications, 1998
4. Valyukhov S.G., Stogney O.V., Filatov M. S. 'Influence of magnetron sputtering conditions on the structure of heat-resistant nanostructured coatings', *News of higher educational institutions. Mechanical engineering (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye)*, 2015, no. 11, pp. 97-105
5. Sánchez-Hernández Z. E., Domínguez-Crespo M. A., Torres-Huerta A. M., Onofre-Bustamante E., Andraca Adamec J., Dorantes-Rosales H. "Improvement of adhesion and barrier properties of biomedical stainless steel by deposition of YSZ coatings using RF magnetron sputtering", *Materials characterization*, 2014, vol. 91, pp. 50–57

Submitted 30.01.2018; revised 27.03.2018

### Information about the authors

**Maksim S. Filatov**, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: [36nord36@mail.ru](mailto:36nord36@mail.ru)

**Oleg V. Stognei**, Dr. Sci. (Physic and Mathematic), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: [sto.sci.vrn@gmail.com](mailto:sto.sci.vrn@gmail.com), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2464-8376>

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ СТЕРЖНЯ  
ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЯЧЕЙКИ ПОЛИМЕРНОГО КАНАЛЬНОГО  
ОГНЕПРЕГРАДИТЕЛЯ В СРЕДЕ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ  
АВИАЦИОННОГО ТОПЛИВА**

© 2018 В.И. Рубинов<sup>1</sup>, В.Г. Самаркин<sup>2</sup>, С.А. Гордиенко<sup>2</sup>, А.А. Попов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия  
им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков им. А. К. Серова,  
г. Краснодар, Россия

**Аннотация:** для систем взрывозащиты топливных баков – отсеков, использующих в качестве наполнителя полимерные каналные огнепреградители, одним из основных технических требований по сохранению работоспособности ячеистой структуры пористого наполнителя является формоустойчивость элементов его ячейки. Формоустойчивость элементов ячейки сводится к обеспечению их пожаростойкости. Пожаростойкость элементов ячейки, в свою очередь, можно обеспечить за счет поддержания заданной температуры по сечению ребра ячейки в течение некоторого временного интервала, то есть в направлении обеспечения термостойкости материала ребра ячейки полимерного каналного огнепреградителя. Математическое описание теплового состояния ребра ячейки полимерного каналного огнепреградителя базируется на физической модели материала стержня и позволяет установить взаимосвязь между его теплофизическими характеристиками и температурой окружающей ячейку среды, плотности теплового потока фазового превращения материала стержня и его термического сопротивления. Предложенная математическая модель пожаростойкости стержня при соответствующем уточнении компонентов может быть использована для выбора значений конструктивных и теплофизических параметров ячейки и оценки пожаростойкости как полимерных, так и металлических (фольгированных) каналных огнепреградителей

**Ключевые слова:** полимерный каналный огнепреградитель, пожаростойкость, термостойкость, стержень

### Введение

Для взрывозащиты топливных баков - отсеков воздушных судов (ВС) используются каналные огнепреградители из эластичных высокопористых ячеистых полимерных материалов с открытыми порами, такие как пенополиуретан ППУ ЭО 100. Эффективность взрывозащиты топливных баков зависит от степени заполнения надтопливного пространства пористым материалом.

Воздействие высоких температур в случае возникновения пожара и положительной гравитационной перегрузки  $g$  в течение определенного промежутка времени может привести к потере устойчивости формы (формоустойчивости) элементарных ячеек пористого наполнителя и уменьшению их объема. Дальнейшее развитие пожара выразится в уменьшении объема блока огнепреградителя, находящегося в надтопливной части топливных баков.

Снижение коэффициента заполнения надтопливного пространства топливных баков огнепреградителем до критического уровня подвергает конструкцию ВС опасности

разрушения вследствие взрыва топливовоздушной смеси.

Пожаростойкость полимерного каналного огнепреградителя во многом определяется его морфологической структурой (материалом, формой, размером, строением и ориентацией) ячеек [1]. Макроструктура ячеек пенополиуретана (ППУ) не носит выраженной правильной геометрической формы [2] и представляет собой (рис.1) полиразмерные пентагональные додекаэдры [3].

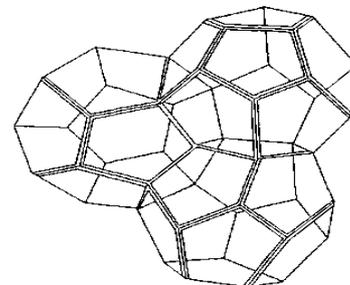


Рис. 1. Модель структуры высокопористого ячеистого наполнителя топливных баков

ППУ относится к ретикулярным порообразам, и вся полимерная фаза материала сосредоточена в ребрах его ячеек. Расчеты показывают, что плотность материала ребер ячеек

составляет от плотности материала полиуретана только 61,2 %. В работе [2] утверждается, что ребра ячеек имеют многочисленные дефекты - отверстия, усредненный диаметр которых составляет  $0,03 \div 0,90$  мкм. Однако крупное увеличение ( $\times 3000$ ) показывает, что отличие в плотности материала вызвано наличием внутри ребер ячеек не отверстий, а воздушных включений указанного размера, а сами ребра имеют вид стержней переменного диаметра, усредненное значение которых находится в диапазоне 64...80 мкм.

Таким образом, если ребро ячейки ППУ представить в виде сплошного полиуретанового стержня, то его диаметр должен составить 78,3 % от усредненного диаметра самого стержня, а его значение будет находиться в интервале 50...62 мкм. Для сохранения формоустойчивости ячейки ППУ необходимо обеспечить поддержание внутри ее ребер заданной температуры. Следовательно, повышение жаростойкости ППУ необходимо осуществлять в направлении обеспечения термостойкости материала стержня ячейки огнепреградителя.

### Предельное тепловое состояние стержня элементарной ячейки полимерного канального огнепреградителя

Обеспечение термостойкости стержней ячеек осуществляется двумя способами (рис. 2):

- 1) созданием на стержнях ячейки защитных теплоизоляционных оболочек с низкой теплопроводностью;
- 2) введением в композицию основы материала ячейки антипиренов, имеющих большую теплоту фазовых превращений.

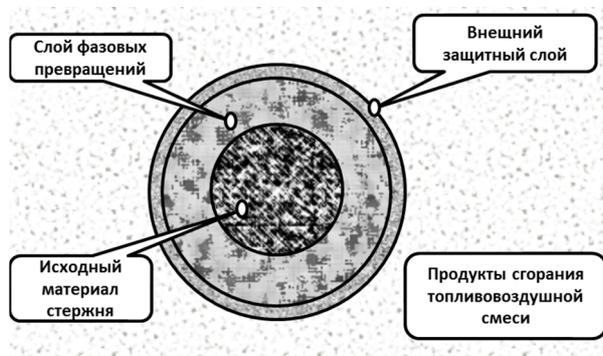


Рис. 2. Физическая модель стержня ячейки полимерного канального огнепреградителя

Примером добавки полифункционального действия является оксиэтилендифосфоновая

кислота (ОЭДФ), сочетающая в себе свойства антипирена и термостабилизатора.

Причина эффективности ОЭДФ в качестве ретарданта заключается в большом количестве коксового остатка, препятствующего распространению теплового потока, который в условиях пожара защищает неразложившийся полимер [4].

В общем случае при термическом разложении в материале стержня может образоваться несколько слоев, один из которых будет являться внешним защитным слоем [4]. Поэтому тепловое состояние стержня определяется изменением структуры его материала.

Математическое описание теплового состояния стержня элементарной ячейки полимерного канального огнепреградителя заключается в установлении взаимосвязи между температурой (временем достижения заданной температуры) на предельном диаметре и такими параметрами, как температура окружающей среды, плотность теплового потока фазового превращения материала стержня, термическое сопротивление стержня.

Под предельным диаметром здесь понимается такой характерный размер условной цилиндрической поверхности внутри стержня ячейки, при прогреве которого до заданной температуры начинается деформация стержня под воздействием высоких температур и положительной гравитационной перегрузки  $q$ , что приводит к уменьшению объема отдельной ячейки и всего блока высокопористого ячеистого материала в целом.

Такое состояние стержня элементарной ячейки полимерного канального огнепреградителя будет считаться его предельным тепловым состоянием.

При определении теплового состояния стержня в каждый момент времени необходимо учитывать зависимость от температуры коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости материалов, образующихся при разложении композиции основы. Физико-геометрическими характеристиками материалов, необходимыми для определения теплового состояния стержня, являются размеры образующегося под воздействием теплового потока на поверхности стержня внешнего защитного слоя:

$d_{\text{защ}}; \lambda_{\text{защ}} = f(T); C_{\text{защ}} = f(T); \rho_{\text{защ}} = f(T).$

Для структуры самого стержня аналогичными величинами являются:

$d_{\text{ст}}; \lambda_{\text{ст}} = f(T); C_{\text{ст}} = f(T); \rho_{\text{ст}} = f(T), d_{\text{пред}}.$

Возмущающие воздействия определяются температурой окружающей среды  $T_0$  и плотностью теплового потока  $g_0$ , одинакового для всех элементов поверхности стержня.

Интенсивность теплообмена наружной поверхности стержня с окружающей средой задается коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$ .

При определении теплового состояния стержня принято допущение, что поле температур в каждом из элементов физической модели стержня ППУ зависит от одной пространственной координаты  $z$ , направленной по радиусу стержня и времени  $t$ .

Таким образом, определение предельного теплового состояния стержня элементарной ячейки канального огнепреградителя предлагается рассмотреть как одномерную нестационарную нелинейную тепловую задачу, где градиент температур направлен противоположно оси  $z$ .

#### Уравнение теплопроводности для стержня элементарной ячейки полимерного канального огнепреградителя с системой граничных условий

Точка, расположенная на внешней поверхности стержня ( $z = 0$ ), характеризуется граничными условиями III рода, в этой точке происходит теплообмен с окружающей средой.

Количество теплоты  $dQ^*$ , введенное в элементарный объем стержня извне за время  $dt$  вследствие процессов теплопроводности, теплоотдачи, теплового излучения, равно изменению внутренней энергии  $dQ$ , содержащейся в этом элементарном объеме

$$dQ = dQ^*, \quad (1)$$

$$dQ^* = dQ_{\text{ТП}} + dQ_{\text{ТО}} + dQ_{\text{ТИ}}, \quad (2)$$

где  $dQ_{\text{ТП}}$  - количество теплоты, отданной теплопроводностью следующей точке (следующему элементарному объему) за время  $dt$ ;

$dQ_{\text{ТО}}$  - количество теплоты, полученной теплоотдачей от окружающей среды;

$dQ_{\text{ТИ}}$  - количество теплоты, полученной через излучение от окружающей среды.

Количество теплоты  $dQ_{\text{ТП}}$ , введенное в элементарный объем стержня теплопроводностью для одномерной тепловой

задачи в единицу времени только в направлении  $z$ , равно

$$dQ_{\text{ТП}} = - \left( \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) dx dy dz. \quad (3)$$

Количество теплоты  $dQ_{\text{ТО}}$ , введенное в элементарный объем стержня теплоотдачей от окружающей среды, равно

$$dQ_{\text{ТО}} = \alpha F (T_0 - T_{\text{С1}}). \quad (4)$$

Величина коэффициента теплоотдачи окружающих стержень газов будет зависеть от вида конвекции: свободной или вынужденной.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  при условии свободной конвекции газа изменяется в пределах

$$\alpha = (5 \div 50) \frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К})},$$

а при условии вынужденной конвекции

$$\alpha = (30 \div 500) \frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К})}.$$

В общем случае коэффициент теплоотдачи зависит от геометрических параметров и температуры среды, окружающей стержень элементарной ячейки полимерного канального огнепреградителя

$$\alpha = 0,70 A \left( \frac{T_0 - T_{\text{С1}}}{L} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (5)$$

где коэффициент  $A = f(Pr, \lambda, \nu)$ .

Конвективный коэффициент теплоотдачи в газе для цилиндрической поверхности стержня элементарной ячейки полимерного канального огнепреградителя также может быть найден при помощи номограмм для изменяющейся температуры поверхности стержня [5].

Количество теплоты, полученной через излучение от окружающей среды:

$$\Delta Q_{\text{ТИ}} = \frac{C_0 F}{\varepsilon_{\text{ГС}}^{-1} + (\varepsilon_{\text{С}}(T))^{-1} - 1} \left( \frac{\varepsilon_{\text{Г}} \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{С1}}}{100} \right)^4 \right), \quad (6)$$

где  $\varepsilon_{\text{С}}(T)$  - степень черноты поверхности стержня,

$C_0$  - коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$\varepsilon_{\text{Г}}, \varepsilon_{\text{ГС}}$  - степень черноты газа и поглощательная способность газа по отношению к излучению наружного слоя с температурой  $T_{\text{С1}}$  соответственно.

Учет отношений степени черноты поверхности стержня и газового объема при температурах газа в формуле (6) позволяет точнее вычислить результирующий поток излучения (в противном случае погрешность достигает значения  $10 \div 15 \%$ ).

Величина степени черноты поверхности стержня в зависимости от температуры аппроксимирована при использовании

значений степени черноты используемых в стержне материалов при прохождении в них химической реакции и реакции фазового превращения [6]:

$$\varepsilon_c(T) = kT - 0.1652, \quad (7)$$

где  $k = 0,0007 \frac{1}{\text{К}}$ .

Газовая фаза в элементарной ячейке полимерного канального огнепреградителя состоит из продуктов сгорания авиационного топлива –  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ , паров углеводородов и галогенов, выделяющихся в газовую фазу ячейки при разложении антипиренов. Степень черноты газовой объема  $\varepsilon_r$  можно определить по следующей эмпирической формуле

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} + \varepsilon_{\text{Cl.F.Br}} - \varepsilon_{\text{CO}_2} \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} \varepsilon_{\text{Cl.F.Br}}. \quad (8)$$

Наибольшее значение имеет излучение продуктов сгорания авиационного топлива (углекислого газа и паров воды)  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , так как остальные газы обычно имеют небольшие концентрации. В таком случае уравнение 8 примет вид

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}. \quad (9)$$

При значении степени черноты основных компонентов продуктов сгорания авиационного топлива (углекислого газа и паров воды) [6]  $\varepsilon_{\text{CO}_2} = 0,06$  и  $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0,09$  степень черноты газовой фазы в элементарной ячейке полимерного канального огнепреградителя будет равна

$$\varepsilon_r = 0,15.$$

Величину поглотительной способности газа  $\varepsilon_{\text{ГС}}$  по отношению к излучению наружного слоя с температурой  $T_{\text{С1}}$  газа можно найти из соотношения [6]

$$\varepsilon_{\text{ГС}} = \varepsilon_r \left( \frac{T_0}{T_{\text{С1}}} \right)^{0,5}. \quad (10)$$

Графически зависимость  $\varepsilon_{\text{ГС}}$  от степени прогрева наружной поверхности стержня представлена на рис. 3.

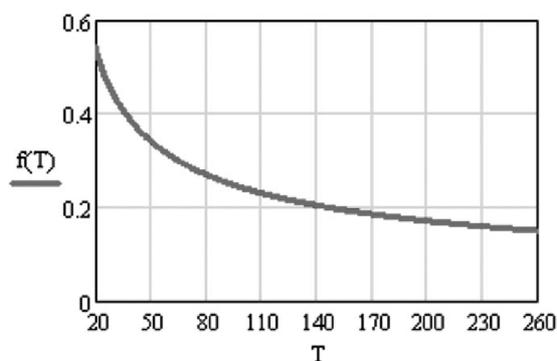


Рис. 3. Поглотительная способность газа:  
 $f(T) = \varepsilon_{\text{ГС}}$  - степень черноты газа при температуре наружной поверхности стержня,  $T = T_{\text{С1}}$  - температура поверхности наружного слоя стержня ( $^{\circ}\text{C}$ )

Поглотительная способность газа  $\varepsilon_{\text{ГС}}$  с ростом температуры  $T_{\text{С1}}$  уменьшается по степенной зависимости.

### Размер фронта фазового превращения материала стержня элементарной ячейки полимерного канального огнепреградителя

Точки, расположенные в толщине стержня, на границе стержня и внешнего слоя, играющего роль пассивной тепловой защиты, характеризуются граничными условиями IV рода, в этих точках происходит теплообмен между слоями материала по закону теплопроводности

$$q_1 = q_2. \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \frac{(T_1 - T_2) * \pi}{\frac{1}{a_{\text{СТ}}d_{\text{СТ}}} + \frac{1}{2\lambda_{\text{ЗАЩ}}} \ln \frac{d_{\text{ЗАЩ}}}{d_{\text{СТ}}} + \frac{1}{a_{\text{ЗАЩ}}d_{\text{ЗАЩ}}}} = \\ & = \frac{(T_2 - T_{\text{пред}}) * \pi}{\frac{1}{a_{\text{СТ}}d_{\text{пред}}} + \frac{1}{2\lambda_{\text{СТ}}} \ln \frac{d_{\text{СТ}}}{d_{\text{пред}}} + \frac{1}{a_{\text{СТ}}d_{\text{СТ}}}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Причем точка, лежащая на границе слоев, принадлежит двум средам с индивидуальными теплофизическими характеристиками.

Если материал стержня активный, с ростом температуры в нем протекают эндотермические явления – фазовые и химические превращения материала стержня.

Если интенсивность поглощения теплоты при фазовом превращении незначительно превышает подвод теплоты за счет теплопроводности, то размеры области фазового перехода стремятся к минимуму. В этом случае процесс агрегатного превращения происходит в узком объеме – фронте превращения материала стержня. Температуру во фронте превращения примем равной температуре фазового перехода.

Если интенсивность поглощения теплоты при фазовом превращении существенно превышает подвод теплоты за счет теплопроводности, то размеры области фазового перехода увеличиваются.

В этом случае процесс агрегатного превращения происходит в значительном объеме – зоне фазового превращения материала стержня.

Температуру в зоне превращения примем равной температуре фазового перехода.

Если зона фазового перехода имеет толщину  $\delta_{\text{ф}}$ , то плотность теплового потока  $q_{\text{ф}}$ ,

затрачиваемого на фазовое превращение, можно найти из соотношения

$$q_{\Phi} = \frac{Q}{(F\tau)} = \frac{Q\delta_{\Phi}}{(V\tau)} = \frac{Q\rho\delta_{\Phi}}{(m\tau)} = \frac{Q}{m}\rho\frac{\delta_{\Phi}}{\tau}. \quad (13)$$

**Движение фронта превращения материала стержня элементарной ячейки полимерного канального огнепреградителя**

Рассмотрим движение фронта превращения материала стержня с распределенными по времени и координате  $z$  температурами  $T_{\Phi}$  (температура фазового перехода вещества) и  $T_x$  (температура химической реакции) в полуограниченной среде.

В начальный момент времени имеется исходная фаза материала стержня с постоянной по объему температурой  $T_{и}$ .

На свободной поверхности исходной фазы поддерживается постоянная температура  $T_{C2}$  (температура внутренней поверхности стенки слоя тепловой защиты). Причем,  $T_{и} < T_{C2}$ , кроме этого  $T_{и} < T_{\Phi} < T_x$ .

Температура внутренней поверхности слоя тепловой защиты  $T_{C2}$  зависит от окружающей температуры  $T_0$ , условий теплоотдачи слоя тепловой защиты, излучения газа и внешней поверхности стержня.

Тепловой поток, направленный от свободной поверхности к исходной фазе, приводит к ее нагреву. По мере нагрева исходной фазы от температуры  $T_{C2}$  до температуры  $T_{\Phi}$  фазового перехода происходит процесс ее превращения и появляется новая фаза.

С течением времени процесс образования новой фазы захватывает все больший объем исходной фазы, толщина новой фазы увеличивается, граница раздела фаз продвигается в объем исходной фазы. При этом процесс нагрева исходной фазы сопровождается увеличением ее температуры.

Процесс агрегатного превращения исходной фазы в новую фазу схематически показан на рис. 4. На приведенной схеме (рис.4) температуры и плотность тепловых потоков обозначены индексами:

$T_0$  – температура окружающей среды;  $T_{C1}$  – температура наружной поверхности слоя тепловой защиты;  $T_{C2}$  – температура внутренней поверхности слоя тепловой защиты, она же – температура свободной поверхности исходной фазы;  $T_{п}$  – температура поверхности предельного диаметра стержня;  $T_{\Phi}$  – температура фа-

зового превращения материала стержня;  $T_x$  – температура химической реакции;  $q_0$  – плотность теплового потока из окружающей среды;  $q_1$  – плотность теплового потока, проходящего через слой тепловой защиты;  $q_{и}$  – плотность теплового потока, проходящего через исходную фазу материала стержня;  $q_{н}$  – плотность теплового потока, проходящего через новую фазу материала стержня;  $q_k$  – плотность теплового потока, проходящего через конечную фазу материала стержня;  $q_{\Phi}$  – плотность теплового потока фазового превращения (образования новой фазы) во фронте материала стержня;  $q_x$  – плотность теплового потока химической реакции во фронте материала стержня.

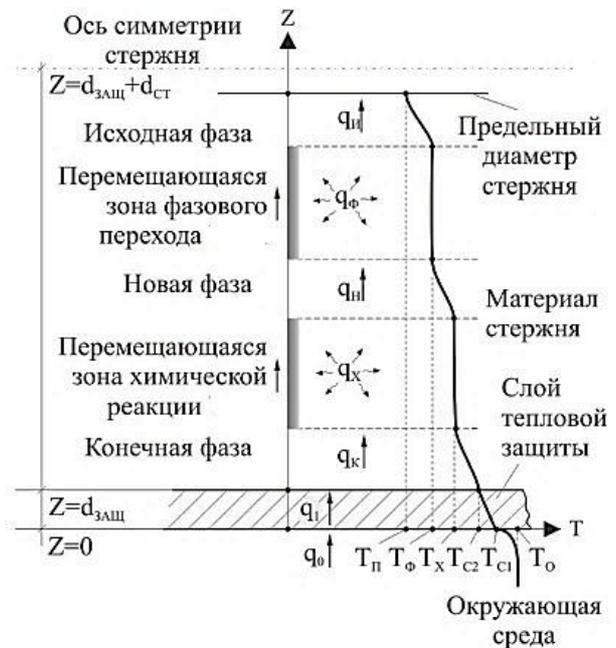


Рис. 4. Схема тепловых потоков и температурное поле, характеризующее изменение агрегатного состояния материала стержня

Положения исходной и новой фаз отсчитываются от их свободной поверхности.

В момент времени  $\tau$  новая фаза существует в области  $0 \leq z \leq \delta_{\Phi}$ , исходная фаза существует в области  $z > \delta_{\Phi}$ .

На свободной поверхности исходной фазы соотношение  $q_1 = q_{и}$  справедливо до момента начала фазового превращения материала стержня. При повышении температуры до  $T_{\Phi}$  на поверхности раздела фаз в общем случае имеет место соотношение  $q_1 = q_{\Phi} + q_{и}$ .

### Баланс тепловых потоков в стержне элементарной ячейки полимерного канального огнепреградителя

Плотность теплового потока из фронта превращения  $q_\phi$  может быть выражена через энтальпию фазового перехода  $I$  и массовую скорость образования новой фазы

$$q_\phi = I\rho \frac{\partial \delta_\phi}{\partial \tau}. \quad (14)$$

Плотность теплового потока из новой фазы через поверхность раздела фаз

$$q_1 = q_n = -\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial z}. \quad (15)$$

Плотность теплового потока от поверхности раздела в исходную фазу

$$q_{и} = -\lambda_{и} \frac{\partial T_{и}}{\partial z}. \quad (16)$$

Тогда баланс теплоты на поверхности раздела фаз

$$-\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial z} = I\rho \frac{\partial \delta_\phi}{\partial \tau} + (-\lambda_{и} \frac{\partial T_{и}}{\partial z}). \quad (17)$$

Для решения уравнения (17) необходимо определить как температурные поля в исходной и новой фазах  $T_{и} = f(z, \tau)$  и  $T_n = f(z, \tau)$ , так и скорость продвижения поверхности раздела фаз  $\frac{\partial \delta_\phi}{\partial \tau}$ .

Приближенно скорость продвижения поверхности раздела можно найти при следующих допущениях:

1) из условия активности материала пренебрегаем тепловым потоком из границы раздела в исходную фазу

$$q_{и} = -\lambda_{и} \frac{\partial T}{\partial z} \approx 0; \quad (18)$$

2) градиент температур на поверхности раздела фаз заменяем средним градиентом по толщине новой фазы, тогда получим

$$-\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial z} = I\rho \frac{\partial \delta_\phi}{\partial \tau}, \quad (19)$$

после разделения переменных

$$\frac{\lambda_n}{I\rho} (T_{c2} - T_\phi) \partial \tau = \delta_\phi \partial \delta. \quad (20)$$

Интегрируя от  $\tau = 0, \delta_\phi = 0$ , получим

$$\delta_\phi = k_1 \sqrt{\tau}, \quad (21)$$

где  $k_1$  - коэффициент пропорциональности, определяемый как

$$k_1 = \sqrt{\frac{2\lambda_n}{I\rho} (T_{c2} - T_\phi)}. \quad (22)$$

Анализ степенной зависимости (21) с дробным показателем указывает, что с увеличением времени  $\tau$  продвижение фронта (рис.5) в исходную фазу замедляется.

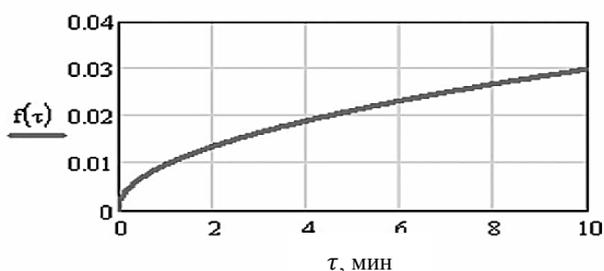


Рис. 5. Продвижение фронта превращения вглубь исходной фазы, характеризующее изменение агрегатного состояния материала:  $f(\tau) = \delta_\phi$  - толщина зоны фазового превращения материала стержня (мкм),  $\tau$  - время

Плотность теплового потока фазового превращения во фронте можно найти из выражения (14), подставив в него зависимость (21)

$$q_\phi = I\rho \frac{\partial}{\partial \tau} (k_1 \tau^{\frac{1}{2}}) = \frac{I\rho k_1}{(2\sqrt{\tau})}. \quad (23)$$

Подставляя в (23) выражение (22), получим

$$q_\phi = \frac{k_2}{\sqrt{\tau}}, \quad (24)$$

где  $k_2$  - коэффициент пропорциональности, определяемый как

$$k_2 = \sqrt{\frac{I\rho \lambda_n}{\tau} (T_{c2} - T_\phi)}. \quad (25)$$

Анализ степенной зависимости (24) показывает, что с увеличением времени  $\tau$  значение плотности теплового потока фазового перехода в материале стержня асимптотически приближается к значению коэффициента  $k_2$ .

Из графика на рис. 6 видно, что в процессе фазового превращения плотность теплового потока в материале стержня вначале велика из-за малых объемов зоны фазового перехода, затем резко уменьшается, оставаясь после этого приблизительно на одном уровне.

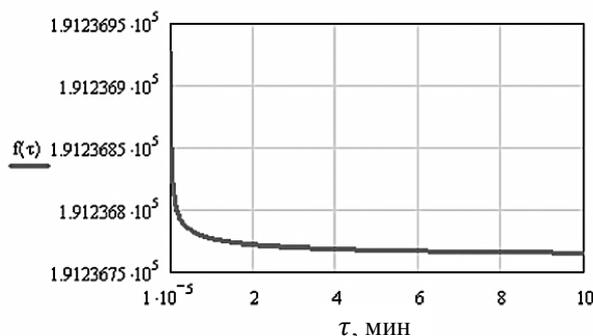


Рис. 6. Изменение во времени плотности теплового потока фазового перехода:  $f(\tau) = q_\phi$  - плотность теплового потока фазового превращения в материале стержня ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ),  $\tau$  - время

Для оценки температурного поля в материале стержня распределение температуры в исходной и новой фазах в первом приближении будем считать одномерным.

Исходная фаза материала существует в границах  $z > \delta_\phi$ , тогда баланс тепла

$$a_{и} \frac{\partial^2 T_{и}}{\partial z^2} = \frac{\partial T_{и}}{\partial \tau}, \quad (26)$$

где  $a_{и}$  - коэффициент температуропроводности исходной фазы материала.

При  $z \rightarrow \infty$ ;  $T_{и} \rightarrow T_{нач}$ , где  $T_{нач}$  - начальная стандартная температура.

Новая фаза существует в границах  $0 \leq z \leq \delta_\phi$ , тогда баланс тепла

$$a_{н} \frac{\partial^2 T_{н}}{\partial z^2} = \frac{\partial T_{н}}{\partial \tau}, \quad (27)$$

где  $a_{н}$  - коэффициент температуропроводности новой фазы материала.

При  $z = 0$ ;  $T_y = T_{c2}$ .

Решение уравнений (26), (27) можно найти, применив функцию источника:

$$T_{н} = T_{c2} + C_1 \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{a_{н}\tau}}\right). \quad (28)$$

$$T_{и} = T_{нач} + C_2 \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{a_{и}\tau}}\right)\right). \quad (29)$$

Функция  $\operatorname{erf}(e) = \Phi(e)$  имеет следующие свойства:  $\operatorname{erf}(0) = 0$ ;  $\operatorname{erf}(\infty) = 1$ .

Зависимость  $\Phi(e)$  от  $e$  сведена в таблицу значений интеграла вероятности Гаусса.

Постоянные  $C_1$  и  $C_2$  можно найти из граничных условий:

при  $z = \delta_\phi$ ;  $T_{н} = T_\phi$ ;  $T_{и} = T_\phi$ , тогда

$$T_\phi = T_{c2} + C_1 \operatorname{erf}\left(\frac{\delta_\phi}{2\sqrt{a_{н}\tau}}\right). \quad (30)$$

$$T_\phi = T_{нач} + C_2 \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\delta_\phi}{2\sqrt{a_{и}\tau}}\right)\right). \quad (31)$$

Отсюда

$$C_1 = \frac{T_\phi - T_{c2}}{\operatorname{erf}\left(\frac{\delta_\phi}{2\sqrt{a_{н}\tau}}\right)}. \quad (32)$$

$$C_2 = \frac{T_\phi - T_{нач}}{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\delta_\phi}{2\sqrt{a_{и}\tau}}\right)}. \quad (33)$$

Комплекс

$$\varepsilon = \frac{z}{(2\sqrt{a}\tau)} \quad (34)$$

рассчитывается при использовании машинного счета пошагово, по времени и координате и зависит от коэффициента температуропроводности

$$a = \frac{\lambda}{(c\rho)}. \quad (35)$$

Значение коэффициента температуропроводности  $a$  вычисляется по данным экспериментальных исследований теплофизических свойств материала.

Точка, расположенная на поверхности предельного диаметра ( $z = d_{защ} + d_{ст}$ ), ха-

рактеризуется допущением, что сток тепла равен нулю, то есть в этой точке теплообмена нет:

$$q = 0. \quad (36)$$

$$\frac{(T_2 - T_{пред})\pi}{\frac{1}{a_{ст}d_{пред}} + \frac{1}{2\lambda_{ст}} \ln \frac{d_{ст}}{d_{пред}} + \frac{1}{a_{ст}d_{ст}}} = 0. \quad (37)$$

Аргументы функции (35) зависят от температуры в расчетной точке

$$\lambda = f(T_i); \quad c = f(T_i); \quad \rho = f(T_i).$$

С ростом температуры от  $T_\phi$  до  $T_x$  на свободной поверхности слоя материала стержня начинается процесс эндотермической химической реакции, неразрывно связанный с процессом теплообмена.

Если реакция идет при  $P = const$ ,  $t = const$ , теплота химической реакции будет равна разности энтальпий начального и конечного состояния системы и не зависит от пути процесса.

$$Q_{(P=const)} = I_1 - I_2 = \Delta I. \quad (38)$$

При расчетах используется энтальпия, в которую включается теплота образования из исходных веществ каждого химического компонента теплоаккумулирующего материала. Полная удельная энтальпия  $n$ -го компонента

$$i_n = \int C_p dT + i_n^0, \quad (39)$$

где  $i_n^0$  - удельная теплота образования  $n$ -го компонента.

Если при образовании  $n$ -го компонента тепловая энергия подводится, то  $i_n^0 > 0$ .

### Анализ математического описания теплового состояния стержня элементарной ячейки полимерного канального огнепреградителя

Составленное уравнение теплопроводности и баланс тепловых потоков с системой граничных условий позволяют установить взаимосвязь между температурой точек в материале стержня и такими параметрами, как температура окружающей среды, плотность теплового потока фазового превращения материала стержня, термическое сопротивление стержня:

1) для точек, граничащих со средой:

$$T_1^{m+1} = T_1^m + \left[ [\alpha(T)(T_0 - T_1^m) - \lambda_{кn+\frac{1}{2}} \times \frac{T_1^m - T_2^m}{\Delta z} + \varepsilon_{пр} c_0 \left( \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_{гс}} \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_1^m}{100} \right)^4 \right) \times \frac{2\Delta\tau}{c(T)\rho\Delta z} \right] \quad (40)$$

2) для точек, расположенных внутри материала стержня:

$$T_n^{m+1} = \left( 1 - \frac{(\lambda_{n-1} + 2\lambda_n + \lambda_{n+1})\Delta\tau}{2(\Delta z)^2 \rho c_n} \right) T_n^m +$$

$$+ \frac{(\lambda_n + \lambda_{n+1})\Delta\tau}{2(\Delta z)^2 \rho c_n} T_{n+1}^m + \frac{(\lambda_n + \lambda_{n-1})\Delta\tau}{2(\Delta z)^2 \rho c_n} T_{n-1}^m. \quad (41)$$

3) для сопряженных точек, расположенных на границе материала внешнего слоя и материала стержня:

$$T_n^{m+1} = T_n^m + [\lambda_{\tau n + \frac{1}{2}}(T_{n+1}^m - T_n^m) - \lambda_{\kappa n - \frac{1}{2}} \times (T_n^m - T_{n-1}^m)] \left[ \frac{\Delta\tau}{2(\Delta z)^2 \rho_{\tau c_{\tau n}}} + \frac{\Delta\tau}{2(\Delta z)^2 \rho_{\kappa c_{\kappa n}}} \right], \quad (42)$$

где все теплофизические характеристики с нижним индексом «к» характеризуют материал внешнего слоя, с нижним индексом «т» характеризуют материал стержня.

4) для точек, расположенных внутри материала стержня, при температуре ниже температуры начала фазового превращения:

$$T_n^{m+1} = \left( 1 - \frac{(\lambda_{n-1} + 2\lambda_n + \lambda_{n+1})\Delta\tau}{2(\Delta z)^2 \rho c_n} \right) T_n^m + \frac{(\lambda_n + \lambda_{n+1})\Delta\tau}{2(\Delta z)^2 \rho c_n} T_{n+1}^m + \frac{(\lambda_n + \lambda_{n-1})\Delta\tau}{2(\Delta z)^2 \rho c_n} T_{n-1}^m. \quad (43)$$

5) для точек, расположенных внутри материала стержня, при температуре выше температуры начала фазового превращения:

$$T_n^{m+1} = \left[ \left( 1 - \frac{(\lambda_{n-1} + 2\lambda_n + \lambda_{n+1})\Delta\tau}{2(\Delta z)^2 \rho c_n} \right) T_n^m + \frac{(\lambda_n + \lambda_{n+1})\Delta\tau}{2(\Delta z)^2 \rho c_n} T_{n+1}^m + \frac{(\lambda_n + \lambda_{n-1})\Delta\tau}{2(\Delta z)^2 \rho c_n} T_{n-1}^m \right] - \sqrt{\frac{\Delta\rho}{2(\Delta z)^2 \tau}} (T_{C2} - T_{\Phi}) \cdot (\sqrt{\lambda_n} - \sqrt{\lambda_{n-1}}) \frac{\Delta\tau}{\rho c_n}. \quad (44)$$

6) для точек, расположенных на условной цилиндрической поверхности внутри материала стержня поверхности, на его предельном диаметре

$$T_n^{m+1} = T_n^m + (T_{n-1}^m - T_n^m) \times \frac{\Delta\tau}{(\Delta z)^2 \rho_{\tau c_{\tau n}}} (\lambda_{\tau n} - \lambda_{\tau n-1}). \quad (45)$$

Эта взаимосвязь представляет собой математическое описание теплового состояния стержня элементарной ячейки полимерного канального огнепреградителя.

Анализ математического описания теплового состояния стержня показывает, что в существующей постановке прямой задачи теплообмена учитываются:

- нестационарность тепловых процессов – изменение полей распределения температуры во времени;

- нелинейность – зависимость внешних условий теплоотдачи, теплового излучения, теплофизических характеристик конструктивных материалов стержня и материала слоя тепловой защиты от температуры;

- сопряженность – описание тепловых процессов в сопрягаемых, контактирующих разнородных средах;

- сложность – анализ разнородных процессов: теплопроводность, конвекцию, радиа-

цию, теплообмен с внутренними эндотермическими эффектами.

## Выводы

Математическое описание теплового состояния стержня элементарной ячейки ППУ по сути представляет собой математическую модель термостойкости структурного элемента (стержня) ячейки полимерного канального огнепреградителя, находящегося в среде продуктов сгорания авиационного топлива.

Исследование предложенной модели даст возможность:

- 1) определить время достижения предельного теплового состояния стержня элементарной ячейки полимерного канального огнепреградителя при известных теплофизических свойствах материала полимера и параметров окружающей среды;

- 2) обосновать выбор значений конструктивных и теплофизических параметров ребра (стержня) ячейки с точки зрения термостойкости при заданных параметрах окружающей среды;

- 3) оценить неравномерность температурного поля и его влияние на теплофизические характеристики материала стержня.

Результаты, полученные при исследовании модели термостойкости стержня, могут быть использованы для определения формоустойчивости ячейки в целом в условиях развития пожара в топливном баке воздушного судна.

Таким образом, предложенная модель может быть использована для оценки эффективности взрывозащиты топливных баков ВС с использованием канальных огнепреградителей из эластичных высокопористых ячеистых полимерных материалов с открытыми порами. При соответствующем уточнении компонентов данная модель может быть использована и для металлических (фольгированных) канальных огнепреградителей.

## Литература

1. Влияние старения на термостойкость материала полимерного канального огнепреградителя / В.И. Рубинов, С.А. Гордиенко, А.А. Попов, А.В. Кушнырев // Вестник Воронежского технологического университета. 2017. Т.13. № 6. С.138-143.
2. Дмитриев А.Н. Управление энергосберегающими инновациями в строительстве зданий. М.: РГОТУПС, 2001. 315 с.

3. Кулаков С.В. Прогнозирование упругих характеристик высокопористых проницаемых ячеистых материалов // Перспективные материалы. 2001. № 4. С.5-10.

4. Цыганова Е.А. Оксидилдифосфоновая кислота, её аминные соли и ангидрид борной и фосфорной кислот, как антипирены для жестких пенополиуретанов: дисс. канд. хим. наук: 02.00.06. Казанский гос. технологический университет. Казань, 2001. 103 с.

5. Дульнев Г.Н. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л.: Энергия, 1968. 360 с.

6. Теплотехника: учеб. для вузов / В.Н. Луканин и др. 2-е изд., перераб. М.: Высш. шк., 2000. 671 с.

Поступила 01.03.2018; принята к публикации 29.03.2018

#### Информация об авторах

**Рубинов Владимир Иванович** - канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника кафедры, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), тел. 8(980)3481953, e-mail: rubinov777@mail.ru

**Самаркин Виктор Георгиевич** - канд. техн. наук, профессор кафедры, Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков им. А.К. Серова (350090, Россия, г. Краснодар-5, ул. Дзержинского, 135), тел. 8(918)4197809, e-mail: wisam62@mail.ru

**Гордиенко Сергей Анатольевич** - канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника кафедры, Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков им. А.К. Серова (350090, Россия, г. Краснодар-5, ул. Дзержинского, 135), тел. 8(918)1950448, e-mail: gordi.serhio2013@yandex.ru

**Попов Андрей Анатольевич** - старший преподаватель, Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков им. А.К. Серова (350090, Россия, г. Краснодар-5, ул. Дзержинского, 135), тел. 8(903)4539154, e-mail: andrei\_.72@mail.ru

### MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE HEAT STATE OF THE ELEMENTARY CELL OF POLYMER CHANNEL FLAME BARRIER IN THE MEDIUM OF COMBUSTION PRODUCTS OF AVIATION FUEL

V.I. Rubinov<sup>1</sup>, V.G. Samarkin<sup>2</sup>, S.A. Gordienko<sup>2</sup>, A.A. Popov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Military scientific educational center of Military-Air forces “Military-Air academy”

<sup>2</sup>Krasnodar Higher Military Aviation School for Pilots

**Abstract:** for explosion protection systems of fuel tanks - compartments using polymer channel flame barriers as a filler, one of the basic technical requirements for maintaining the cellular structure of a porous filler is the form-stability of its cell elements. The form-stability of cell elements comes to ensuring their fire resistance. The fire resistance of the cell elements in turn can be ensured by maintaining a predetermined temperature along the cross-section of the cell edge during a certain time interval, i.e. in the direction of ensuring the heat resistance of the material of the edge of the cell of the polymer channel flame barrier. The mathematical description of the thermal state of the edge of a cell of a polymer channel flame barrier is based on the physical model of the rod material and makes it possible to establish a relationship between its thermophysical characteristics and the temperature of the surrounding medium, the density of the thermal flux of the phase transformation of the rod material and its thermal resistance. The proposed mathematical model of the rod fire resistance with appropriate refinement of the components can be used to select the values of structural and thermophysical parameters of the cell and to assess the fire resistance of both polymer and metal (foil) channel flame barriers

**Key words:** polymer channel flame barrier, fire resistance, heat resistance, rod

#### References

1. Rubinov V.I., Gordienko S.A., Popov A.A., Kushnyrev A.V. “The influence of aging on the thermal stability of a polymer channel flame barrier material”, *The Bulletin of Voronezh Technological University (Vestnik Voronezhskogo tekhnologicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 6, pp. 138-143.

2. Dmitriev A.N. “Management of energy-saving innovations in building construction” “Upravlenie energosberegayushchimi innovatsiyami v stroitel'stve zdaniy”, Moscow, RGOTUPS, 2001, 315 p.

3. Kulakov S.V. “Prediction of the elastic characteristics of high-permeable porous materials”, *Perspective materials (Perspektivnye materialy)*, 2001, no. 4, pp. 5-10.

4. Tsyganova E.A. “Oxyethylidenediphosphonic acid, its amine salts and boronic and phosphoric anhydride, as flame retardants for rigid polyurethane foams: diss. Cand. Chem. Sciences” (“Oksietilidendifosfonovaya kislota, yeyo aminnyye soli i ангидрид борной i фосфорной кислот, как антипирены для жестких пенополиуретанов: diss. канд. хим. наук”), Kazan, Kazan State Technological University, 2001, 103 p.

5. Dul'nev G.N. “Heat exchange in radio electronic devices” (“Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах”), Leningrad, En-

ergiya, 1968, 360 p.

6. Lukanin V.N. "Heat engineering: Manual" ("Teplotekhnika: ucheb. dlya vuzov"), Moscow, Vysshaya shkola, 2000, 671 p.

Submitted 01.03.2018; revised 29.03.2018

#### Information about the authors

**Vladimir I. Rubinov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Military scientific educational center of Military-Air forces "N.E.Zhukovsky and JU.A. Gagarin Military-Air academy" (54A Starykh Bol'shevikio st., Voronezh 394064, Russia), ph. 8(980)3481953, e-mail: rubinov777@mail.ru

**Viktor G. Samarkin**, Cand. Sc. (Technical), Professor, Krasnodar Higher Military Aviation School for Pilots (135 Dzerzhinskogo st., Krasnodar-5 350090, Russia), ph. 8(918)4197809, e-mail: wisam62@mail.ru

**Sergey A. Gordienko**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Krasnodar Higher Military Aviation School for Pilots (135 Dzerzhinskogo st., Krasnodar-5 350090, Russia), ph. 8(918)1950448, e-mail: gordi.serhio2013@yandex.ru

**Andrey A. Popov**, Assistant Professor, Krasnodar Higher Military Aviation School for Pilots (135 Dzerzhinskogo st., Krasnodar-5 350090, Russia), ph. 8(906)4315414, e-mail: gordi.serhio2013@yandex.ru

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА СЖАТИЕ ПОСЛЕ УДАРА В СООТВЕТСТВИИ СО СТАНДАРТОМ ASTM D 7137

© 2018 А.М. Кудрин<sup>1</sup>, О.А. Караева<sup>1</sup>, К.С. Габриельс<sup>2</sup>, А.В. Сологченко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ЗАО «Русавиаинтер», г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

**Аннотация:** проведены физико-механические испытания по определению предела прочности при сжатии после удара в соответствии со стандартом ASTM D 7137. Испытания проводились на специально подготовленных элементарных образцах, изготовленных из однонаправленного безуткового препрега, адаптированного для процессов автоматизированной выкладки, в рамках комплексного исследования материала. Стандарт испытания описывает низкоскоростное ударное воздействие на ПКМ, имитируя возможные повреждения материала, возникающие при производстве и/или ремонте. Испытания проводятся в три этапа: ударное воздействие падающим грузом, определение типа повреждения методом неразрушающего контроля, сжатие до полного разрушения. Каждый элементарный образец был подвергнут локальному поперечному удару силой в 33,5 Дж. Визуально определено разрушение поверхностного слоя ПКМ, методом ультразвукового контроля определен тип разрушения в объеме материала. Проведенные в соответствии со стандартом испытания на сжатие позволили определить основной характер разрушения элементарных образцов ПКМ, величины предела прочности на сжатие после удара (остаточной прочности) и относительной деформации материала. При увеличении сжимающей нагрузки растрескивание матрицы связующего вызвало расслоение в толще образцов в области удара, которое привело к полному разрушению материала по всей ширине образцов

**Ключевые слова:** полимерный композиционный материал, ПКМ, удар падающим грузом, сжатие после удара, остаточная прочность

### Введение

В последние десятилетия использование полимерных композитных материалов (ПКМ) в качестве конструкционных становится все более оправданным вследствие не только близких к идеальному сочетанию весовых и прочностных характеристик, но и неуклонно снижающейся цене на исходные для них материалы. ПКМ, армированные углеродными волокнами, также известны своей устойчивостью к воздействию окружающей среды и износостойкостью. В авиационных структурах ПКМ с легкостью заменяют металлические сплавы, доводя процент использования композитов до 50 процентов даже в гражданских самолетах.

Вместе с тем ПКМ, как и все авиационные материалы, подвержены риску возникновения структурных дефектов и повреждений. Воздушные пустоты в микроструктуре материала, ошибки проектирования и формования, коробление поверхности, наличие точечных дефектов (концентраторов напряжений) ввиду необходимости изготовления технических отверстий, коррозия материала являются главными современными

проблемами композиционного производства, приводящими к существенному снижению предельных нагрузок. Качественной оценкой сопротивления предельным кратковременным механическим воздействиям является устойчивость к повреждениям при ударной нагрузке, которым часто подвержены композиционные элементы конструкции во время процесса изготовления, эксплуатации и обслуживания. Ударная нагрузка разделяется на несколько категорий [1]:

- нагрузки малых скоростей (воздействие на скоростях ниже 10 м/с);
- нагрузки средних скоростей (воздействие на скоростях от 10 до 50 м/с);
- высокоскоростные/баллистические нагрузки (до 1000 м/с).

Повреждения, вызванные при малых скоростях воздействия, приводят к частичному разрушению полимерных матриц и волокон, деламинации поверхности. Характер повреждений от баллистических нагрузок в целом схож с низкоскоростными повреждениями, но имеет более угрожающие для всей конструкции последствия, приводящие к расслоению ПКМ, требующих

ремонтных работ по замене. Внимание ученых направлено на повышение эффективности воздействия композитов ударным нагрузкам при низких скоростях воздействия. Среди основных методов выделяются специальная обработка волокон, определенные схемы их чередования, матричная модификация [2-3]. Существенно повысить вязкость разрушения можно с использованием гибридных ПКМ – стеклоуглепластиков [4]. Гибридизация представляет собой комбинацию двух и более видов армирующих наполнителей и часто обусловлена не только необходимостью сопротивления вязкостному разрушению, но и снижению стоимости ПКМ за счет сочетания дорогостоящих материалов с более дешевыми (стеклянными).

С целью апробирования современного стандарта по определению прочностных характеристик ПКМ после воздействия ударных напряжений (остаточная прочность) были проведены исследования чистого углепластика на основе сертифицированного авиационного углеродного волокна и термореактивного клеевого связующего.

### Методика эксперимента

В качестве объектов исследовательских испытаний для отработки методики по определению прочностных характеристик полимерных композиционных материалов после повреждения (удара) использовались специально подготовленные образцы ПКМ на основе однонаправленного безуткового препрега с армирующим наполнителем Formosa 12K в термореактивной матрице на эпоксидной основе T-107. Изготовление препрега производилось в рамках адаптации технологического материала для систем автоматизированной выкладки, которое предусматривало комплексные исследовательские испытания прочностных и эксплуатационных характеристик материала.

Испытания на сжатие после удара проводят при температуре  $23 (\pm 2) ^\circ\text{C}$  на двухколонной раме напольного типа серии 5980 модель Instron 5985 в соответствии со стандартом ASTM D 7137 [5] с применением оснастки WTF-C1-84.

Испытание ПКМ на сжатие после удара проводится в три этапа.

На первом этапе образцы для испытаний помещают лицевой стороной вверх по центру

стального основания зажимного приспособления и закрепляют при помощи четырех зажимов как показано на рисунке 1. Образцы подвергают воздействию поперечного локального удара в соответствии со стандартом ASTM D 7137 [5] на установке для испытания на удар, разработанной ЗАО «ИНУМиТ», с падающим грузом с полусферическим индентором диаметром  $16 (\pm 0,1)$  мм и направляющим механизмом в виде направляющей колонны как показано на рисунке 2. Энергия падающего груза составляет 6,7 Дж на каждый мм толщины образца.

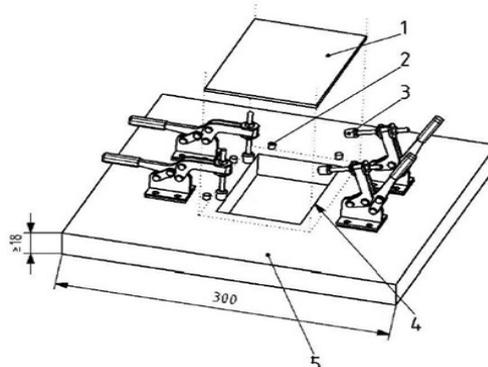


Рис. 1. Зажимное приспособление для испытания на удар падающим грузом: 1 – образец для испытания; 2 – направляющий штифт; 3 – зажим; 4 – отверстие длиной  $125 (\pm 1)$  мм, шириной  $75 (\pm 1)$  мм; 5 – стальное основание

Энергию воздействия поперечного локального удара вычисляют по формуле:

$$E = E_c t \quad (1)$$

где  $E_c$  – коэффициент нормирования энергии удара на толщину образца, равный 6,7 Дж/мм;  $t$  – толщина образца для испытания, мм.

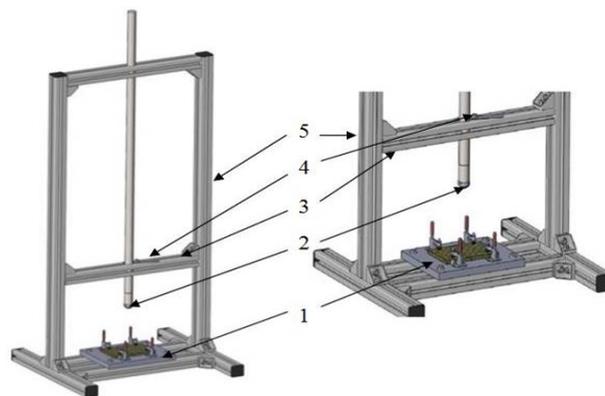


Рис. 2. Копер с падающим грузом: 1 – зажимное приспособление; 2 – индентор; 3 – траверса; 4 – фиксирующее устройство; 5 – направляющая колонна

На втором этапе устанавливают тип повреждения после удара путем неразрушающего контроля и проводят измерения глубины вмятины до самой глубокой точки с помощью микрометра с добавочным приспособлением. Измерение глубины вмятины производят дважды по взаимно перпендикулярным направлениям, после чего рассчитывают среднее значение.

На третьем этапе проводят испытания на сжатие в соответствии со стандартом ASTM D 7137 [5] с применением оснастки WTF-C1-84 (рис. 3), в которую закрепляются подготовленные образцы прямоугольной формы. Упор образца обеспечивается с помощью боковых зажимных плит, прикрепленных к боковым угловым стойкам, и верхней и нижней зажимными плитами. Нагрузку на образец подают последовательно с постоянной скоростью перемещения подвижных плит испытательной машины Instron 5985. Фиксируют максимальную нагрузку, предшествующую разрушению образца.

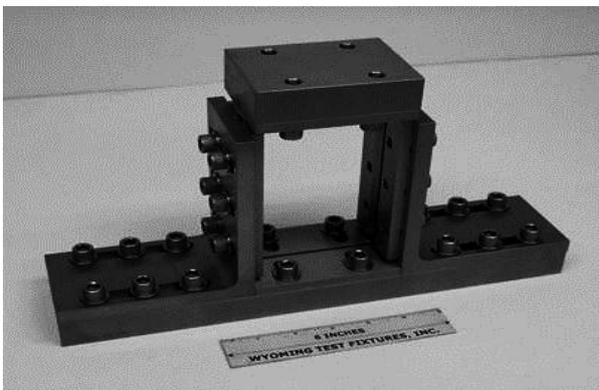


Рис. 3. Оснастка WTF-C1-84 для проведения испытания на сжатие после удара

Вычисляют предел прочности на сжатие после удара ( $\sigma$ , МПа) по формуле:

$$\sigma = \frac{F}{b t}, \quad (2)$$

где  $F$  – нагрузка, при которой произошло разрушение, Н;

$b$  – ширина образца для испытаний, мм;

$t$  – толщина образца для испытаний, мм.

### Результаты и обсуждения

Для проведения испытаний были подготовлены элементарные образцы ПКМ в количестве 6 штук. На первом этапе они были подвержены ударной нагрузке в виде

падающего груза массой 5 кг с высоты, обеспечившей энергию удара в 33,5 Дж (согласно формуле (1) при заданной величине в 6,7 Дж/мм и толщине образца  $5 \pm 0,05$  мм). Анализ повреждений выявил локальные вмятины в месте падения груза, не превышающие по площади половину ширины элементарного образца (рис. 4, мелом отмечена область повреждения), что позволило приступить к этапу испытания на сжатие.

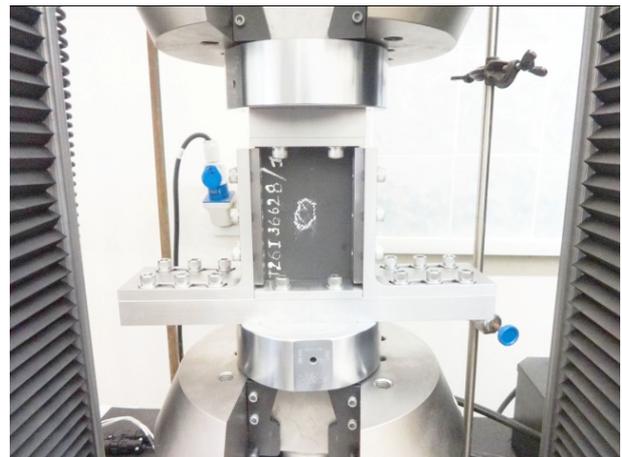


Рис. 4. Локальные повреждения на поверхности элементарного образца

Каждый образец был размещен в оснастке WTF-C1-84 (рис. 3) и подвержен нагрузке со скоростью 1,3 мм/мин до момента полного разрушения. Результаты испытаний для всех шести образцов представлены на рис. 5. Расчет предела прочности по формуле (2) приведен в табл. 1.

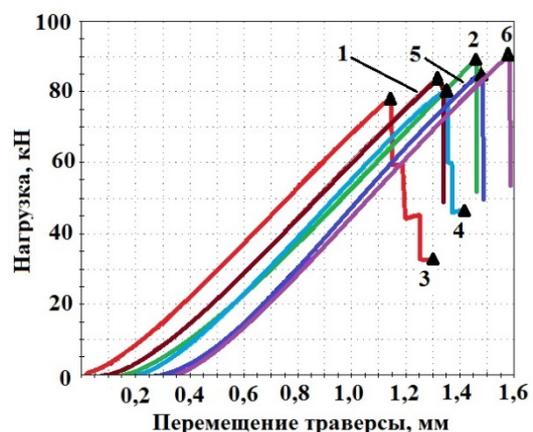


Рис. 5. Зависимость приложенной нагрузки от перемещения траверсы испытательной машины

Полученные значения предела остаточной прочности после воздействия ударной нагрузки существенно ниже истинных значений предела прочности материала [6]. После удара на поверхности ПКМ произошло растрескивание матрицы связующего Т-107, вызвавшее его деформацию. Приложение нагрузки при сжатии привело к увеличению деформации вдоль приложенной нагрузки с образованием значительных микротрещин матрицы в объеме образца [7]. Разрушение матрицы продолжалось вплоть до максимальных значений нагрузки при сжатии (табл. 2), продолжилось расслоением ПКМ в области удара перпендикулярно приложенному напряжению и завершилось разрушением углеродных волокон по всей ширине образца (рис. 6), имея характер разрушения типа LDM [5]. Для образцов 3 и 4 максимальная нагрузка привела к частичному разрушению образцов, для полного разрушения потребовалось продолжение испытания при постоянной нагрузке – разрушение по типу LDM произошло при нагрузках в два раза ниже максимальных (рис. 5, табл. 2).

Таблица 1  
Данные по испытанию образцов ПКМ на сжатие после удара

№ п/п	Толщина образца (h), мм	Ширина образца (b), мм	Максимальная нагрузка ( $F_{max}$ ), кН	Величина предела прочности ( $\sigma$ ), МПа
1	5,05	100,2	84,47	166,37
2	5,05	100,21	88,82	175,62
3	4,98	100,2	78,14	156,74
4	5,02	100,37	80,87	160,42
5	4,96	100,4	86,26	173,4
6	4,96	100,18	90,52	182,14
Ср.	5,00	100,26	84,84	169,115

Таблица 2  
Максимальная нагрузка, нагрузка разрушения, относительная деформация ПКМ

№ п/п	Нагрузка разрушения ( $F_p$ ), кН	Максимальная нагрузка ( $F_{max}$ ), кН	Длина образца (L), мм	Деформация, %
1	81,57	84,47	150,17	0,560
2	88,82	88,82	150,04	0,593

Продолжение табл. 2

3	32,89	78,14	150,14	0,502
4	46,37	80,87	150,28	0,503
5	84,95	86,26	150,46	0,527
6	89,62	90,52	150,08	0,542

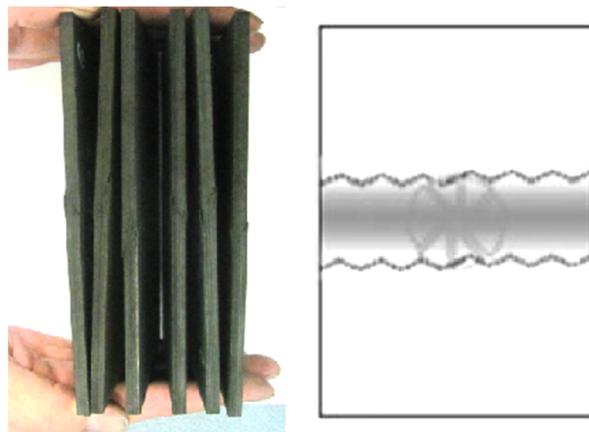


Рис. 6. Внешний вид разрушенных образцов ПКМ и схематическое изображение механизма разрушения образцов расслаиванием в ширину

Расслоение ПКМ является наиболее критическим механизмом разрушения при воздействии нагрузок на малых скоростях. Расслоение вызвано растрескиванием матрицы и превышением порогового значения ее энергии связи с армирующим волокном. Деламинация (расслоение) приводит к существенному снижению пределов прочности при сжатии и межслоевому сдвигу [2]. Относительная деформация образцов ПКМ составила 0,5-0,6 %.

### Заключение

Проведенные физико-механические испытания по определению предела прочности при сжатии после удара в соответствии со стандартом ASTM D 7137 позволили определить основной характер разрушения элементарных образцов ПКМ – LDM (боковой через разрушение по середине образца); рассчитать предел прочности на сжатие (остаточная прочность) – 169 МПа, величина которого существенно ниже истинных прочностных значений материала, не подверженного ударной нагрузке; определить относительную деформацию образцов ПКМ вдоль приложенной нагрузки – 0,5 - 0,6 %. Анализ экспериментальных данных показал, что при увеличении сжимающей нагрузки

растрескивание матрицы связующего вызвало расслоение в толще образцов в области удара, которое привело к полному разрушению материала по всей ширине образцов.

#### Литература

1. Vaidya Uday K., Serge Abrate. Impact Response of Laminated and Sandwich Composites // *Impact Engineering of Composite Structures*, Brimingham: Springer Wien New York. 2011. P. 97-191.
2. Drop Weight Impact Studies of Woven Fibers Reinforced Modified Polyester Composites / M.T. Isa, A.S. Ahmed, B.O. Aderemi, R.M. Taib, H.M. Akil, I.A. Mohammed-Dabo // *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*. 2014. Issue 24. P. 97-112.
3. Experimental analysis of CFRP laminates subjected to compression after impact: The role of impact-induced cracks in failure/ S. Rivallant, C. Bouvet, E.A. Abdallah, B. Broll,

J.-J. Barrau // *Composite Structures*. 2014. vol. 111. P. 147-157.

4. The Influence of Content of Reinforcing Filler on Mechanical Properties of Carbon-Glass Fiber Reinforced Plastics in Matrix T-107/ O.V. Ovdak, Yu.E. Kalinin, A.M. Kudrin, O.A. Karaeva, D.Ya. Degtyarev // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018. Vol. 9. Issue 1. P. 108-113.
5. ASTM D 7137 Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates.
6. Разработка технологии автоматизированной выкладки полимерного композиционного материала/ К.С. Габриельс, О.А. Караева, А.М. Кудрин, Д.В. Полухин // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2017. Т. 13. № 3. С. 139-143.
7. Experimental analysis of CFRP laminates subjected to compression after edge impact / B. Ostré, C. Bouvet, C. Minot, J. Aboissiére // *Composite Structures*. 2016. vol. 152. P. 768-778.

Поступила 19.02.2018; принята к публикации 27.03.2018

#### Информация об авторах

**Кудрин Алексей Михайлович** – канд. физ.-мат. наук, директор по науке Научно-технического департамента, ЗАО «Русавиаинтер» (394004 г. Воронеж, ул. Ленинградская 31-В), e-mail: [kudrin@rusaviainter.com](mailto:kudrin@rusaviainter.com)  
**Караева Оля Анатольевна** – канд. физ.-мат. наук, ведущий инженер-исследователь Научно-технического департамента, ЗАО «Русавиаинтер» (394004 г. Воронеж, ул. Ленинградская 31-В), e-mail: [karaeva@rusaviainter.com](mailto:karaeva@rusaviainter.com)  
**Габриельс Константин Сергеевич** – инженер-исследователь кафедры физики твердого тела, Воронежский государственный технический университет (394026 г. Воронеж, Московский пр-т, 14), e-mail: [gabriels\\_k@mail.ru](mailto:gabriels_k@mail.ru)  
**Солопченко Александр Викторович** – ведущий специалист кафедры химической технологии новых материалов, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (119991 г. Москва, Ленинские горы 1, стр. 3), e-mail: [metilmsu@gmail.com](mailto:metilmsu@gmail.com)

### DETERMINATION OF THE ULTIMATE STRENGTH OF POLYMER COMPOSITE MATERIAL FOR COMPRESSION AFTER IMPACT, IN ACCORDANCE WITH STANDARD ASTM D 7137

A.M. Kudrin<sup>1</sup>, O.A. Karaeva<sup>1</sup>, K.S. Gabriels<sup>2</sup>, A.V. Solopchenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Rusaviainter, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

**Abstract:** physical and mechanical tests were carried out to determine the compressive strength after impact in accordance with ASTM D 7137. The tests were carried out on specially prepared elementary samples made of unidirectional prepreg, adapted for automated tape laying systems, as part of a comprehensive material study. The test standard describes the low-speed impact on the PCM, simulating possible material damage that occurs during manufacture and/or repair. Tests are carried out in three stages: impact drop, determination of the type of damage by the method of nondestructive testing (NDT), compression before complete destruction. Each elementary sample was subjected to a local lateral impact with a force of 33.5 J. The destruction of the surface layer of PCM was determined visually, the type of destruction in the volume of the material was determined by ultrasonic testing. The compressive tests carried out in accordance with the standard made it possible to determine the main character of the destruction of elementary samples of PCM, the value of the compressive strength after impact (residual strength) and the relative deformation of the material. Cracking of the matrix of the binder caused delamination in the thickness of the sample in the region of impact by compressive stress, which led to a complete destruction of the material over the entire width of the samples

**Key words:** polymer composite material, PCM, impact drop, compression after impact, residual strength

#### References

1. Vaidya Uday K. "Serge Abrate Impact Response of Laminated and Sandwich Composites", *Impact Engineering of Composite Structures*, Brimingham, Springer Wien New York, 2011, pp. 97-191.
2. Isa M.T., Ahmed A.S., Aderemi B.O., Taib R.M., Akil H.M., Mohammed-Dabo I.A. "Drop Weight Impact Studies of Woven Fibers Reinforced Modified Polyester Composites", *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 2014, issue 24, pp. 97-112.
3. Rivallant S., Bouvet C., Abdallah E.A., Broll B., Barrau J.-J. "Experimental analysis of CFRP laminates subjected to compression after impact: The role of impact-induced cracks in failure", *Composite Structures*, 2014, vol. 111, pp. 147-157.
4. Ovdak O.V., Kalinin Yu.E., Kudrin A.M., Karaeva O.A., Degtyarev D.Ya. "Influence of reinforcing fillers on the mechanical properties of carbon-glass fiber plastics in the T-107 matrix", *Materials Science (Materialovedenie)*, 2017, no. 7, pp. 32-37.
5. ASTM D 7137 Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates.
6. Gabriels K.S., Karaeva O.A., Kudrin A.M., Polukhin D.V. "Development of an automated layout technology of polymer composite material", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 3, pp. 139-143.
7. Ostré B., Bouvet C., Minot C., Aboissiére J. "Experimental analysis of CFRP laminates subjected to compression after edge impact", *Composite Structures*, 2016, vol. 152, pp. 768-778.

Submitted 19.02.2018; revised 27.03.2018

#### Information about the authors

**Aleksey M. Kudrin**, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Director of science of Scientific Technical Department, CC Rusaviainter (31-B Leningradskaya st., Voronezh 394004, Russia), e-mail: [kudrin@rusaviainter.com](mailto:kudrin@rusaviainter.com)  
**Ol'ga A. Karaeva**, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Principal Research Engineer of Scientific Technical Department, CC Rusaviainter (31-B Leningradskaya st., Voronezh 394004, Russia), e-mail: [karaeva@rusaviainter.com](mailto:karaeva@rusaviainter.com)  
**Konstantin S. Gabriels**, Research Engineer, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospect, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: [gabriels\\_k@mail.ru](mailto:gabriels_k@mail.ru)  
**Aleksandr V. Solopchenko**, Key Specialist, Lomonosov Moscow State University (1 Leninskie gory, Moscow 119991, Russia), e-mail: [metilmsu@gmail.com](mailto:metilmsu@gmail.com)