

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

| | |
|--|----|
| Разработка автоматизированной информационной системы диагностики и выбора тактики лечения гиперпластических процессов эндометрия Е.Н. Коровин, О.В. Родионов, М.А. Сергеева | 4 |
| Управляемая инерциальная навигационная мультисистема В.П. Напольский, С.В. Слесаренок, И.П. Шепеть, А.В. Захарин, В.И. Рубинов | 8 |
| Цифровое моделирование в SIMULINK системы прямого управления момента с многослойным персептроном Ю.И. Ерёмченко, М.Г. Данилова, К.О. Рукавицын | 15 |
| Многоальтернативное управление экспериментом с использованием моделей сопряженных систем С.Л. Подвальный | 19 |

Энергетика

| | |
|---|----|
| Расчётный сравнительный анализ вариантов профилирования рабочего колеса центробежного насоса А.В. Кретинин, А.В. Иванов, Д.Н. Галдин | 26 |
| Система обеспечения безопасности отделения груза из отсека самолета-носителя на основе многоимпульсного моментного двигателя поперечного управления В.А. Нестеров, И.М. Семенов, А.П. Будник | 32 |

Радиотехника и связь

| | |
|---|----|
| Параллельное недвоичное LDPC-декодирование на графическом процессоре А.В. Башкиров, Ю.В. Дьячков, М.В. Хорошайлова | 38 |
| Методика оценки ближнего электромагнитного поля методом эквивалентной модели В.В. Глотов, М.А. Ромащенко | 44 |
| Полностью параллельный недвоичный LDPC-декодер с динамическим изменением частоты стробирования А.В. Башкиров, А.В. Муратов, М.В. Хорошайлова | 48 |

Машиностроение и машиноведение

| | |
|--|----|
| Проектирование комбинированных процессов модификации поверхностного слоя типовых деталей С.Н. Григорьев, С.В. Сафонов, В.П. Смоленцев | 54 |
| Особенности технологии формообразования металлических сотовых панелей для кожухов турбореактивных двигателей А.Н. Карпухин, И.М. Анохин | 62 |

Физика

| | |
|--|----|
| Электрические свойства двухслойных тонкопленочных структур ZnO/ZnO-Fe Ю.Е. Калинин, В.А. Макагонов, С.Ю. Панков, А.В. Ситников | 66 |
|--|----|

| | |
|--|-----------|
| Установка для измерения комплексной магнитной проницаемости высокотемпературных сверхпроводников | |
| И.М. Голев, А.А. Гребенников, А.В. Сергеев..... | 71 |
| Зависимость скорости роста нитевидного кристалла, лимитируемого гетерогенной химической реакцией, от состава газовой фазы при больших концентрациях тетрахлорида кремния | |
| О.Д. Козенков, А.А. Щетинин, В.В. Горбунов, И.В. Сычев..... | 78 |
| Моделирование технологических процессов переохлаждения криогенных жидкостей | |
| А.А. Гребенников, О.В. Калядин, А.В. Сергеев, О.П. Свиридов, И.М. Голев, С.А. Курьянов..... | 85 |
| Адгезионная прочность композитных покрытий на основе железа | |
| И.М. Трегубов, М.Ю. Смолякова, М.А. Каширин..... | 92 |
| Перспективы развития альтернативных источников энергии: водород в металлах и сплавах, полученных методом электрокристаллизации | |
| А.В. Звягинцева..... | 97 |

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 681.3

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ И ВЫБОРА ТАКТИКИ ЛЕЧЕНИЯ ГИПЕРПЛАСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЭНДОМЕТРИЯ

Е.Н. Коровин, О.В. Родионов, М.А. Сергеева

В статье рассматриваются вопросы построения автоматизированной информационной системы диагностики и выбора схемы лечения гиперпластических процессов эндометрия на основе статистического и нейросетевого моделирования. Для построения математических моделей диагностики и выбора тактики лечения использовались статистические данные по 230 пациенткам с гиперпластическими процессами эндометрия: гиперплазия эндометрия, полип эндометрия и полип цервикального канала. Для повышения эффективности диагностики гиперпластических процессов эндометрия и оценки значимости клинических признаков на первом этапе исследования предлагается использовать метод построения дерева решений. В результате было построено несколько деревьев решений: полное (бинарное), полное с множеством потомков в узле, компактное (бинарное), компактное с множеством потомков в узле. В результате анализа полученных результатов было выбрано «полное (бинарное) дерево решения». Апробация построенной модели была проведена на тестовой выборке, где достоверность постановки диагноза по методу «деревьев решений» составляет 77,5 %. На следующем этапе исследования были получены классификационные функции Фишера для постановки предварительного диагноза для каждого типа патологии эндометрия. В результате анализа и тестирования полученных классификационных моделей было установлено, что точность диагностических моделей на основе дискриминантного анализа составляет 85,5 %. Для уточнения диагноза на втором этапе исследования была построена нейросетевая модель, где использовалась нейронная сеть в виде многослойного перцептрона, где на вход сенсорного слоя подаются значения 12 признаков заболевания, а на выходе результативного слоя получаем данные о виде гиперпластического процесса эндометрия. На основе тестирования контрольной группы больных было установлено, что точность диагностирования на основе нейросетевого моделирования составляет 93,9 %. Полученные модели на основе метода построения дерева решений, дискриминантного анализа и нейросетевого моделирования используются в автоматизированной информационной системе, которая способствует повышению эффективности диагностики и выбора тактики лечения гиперпластических процессов эндометрия

Ключевые слова: информационные системы, диагностика, лечение, гинекология

ВВЕДЕНИЕ

Гиперпластические процессы эндометрия – это доброкачественная патология слизистой оболочки матки, которая развивается на фоне относительной или абсолютной гиперэстрогении. Проблема развития гиперпластических процессов в эндометрии актуальна, с одной стороны, из-за высокого риска их малигнизации, с другой стороны, единого, с эндокринным бесплодием, механизмами развития. Среди онкологических заболеваний женского населения рак эндометрия занимает 2-е место после злокачественного поражения молочных желез и составляет 20% от числа всех опухолей гениталий. Перерождение гиперпластических процессов эндометрия в состояние рака происходит в 0,20—50% случаев и зависит от морфологических особенностей заболевания, длительностью его рецидивов, возрастом пациентки. Процесс имплантации плодного яйца весьма сложен и обуславливает необходимость соблюдения ряда условий: высокой степени одновременности между эндометрием и эмбрионом, адекватного гормонального окружения, нормальных анатомических

взаимоотношений и функции половых клеток. Из-за сложности процесса становится неудивительным факт частых неудач имплантации, особенно в условиях патологии эндометрия. С клинической точки зрения, эти неудачи становятся все более значимой проблемой. Бесплодие встречается в среднем у каждой 6-й пары, и это число продолжает расти.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для построения «дерева решений», ориентированного на диагностику развития гиперплазии эндометрия, полипа эндометрии и полипа цервикального канала пациенток по набору входных признаков, использовалась программа Deductor и алгоритм C4.5. Обучающая выборка, состояла из 150 историй больных, из них 57 пациентов с вероятностью развития гиперплазии эндометрия, 50 – полип эндометрия, 43 - полип цервикального канала. В результате было построено несколько деревьев решений: полное (бинарное), полное с множеством потомков в узле, компактное (бинарное), компактное с множеством потомков в узле.

Достоверность построенных «деревьев решений» было выявлено путем проверки тестовой выборки из 80 историй больных (39 пациенток с вероятностью развития гиперплазии эндометрия, 28 пациенток с полипом эндометрии, 13 пациенток с полипом цервикального канала), не вошедших в обучающую выборку. Сравнительная характеристика

Коровин Евгений Николаевич – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: korovin@saums.vorstu.ru
Родионов Олег Валерьевич – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: rodionov@saums.vorstu.ru
Сергеева Маргарита Анатольевна – ВГТУ, ассистент, e-mail: saums@vorstu.ru

эффективности разработанных «деревьев решений» представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты работы алгоритма программы

| № | Дерево решения | Обучающее | | Тестовое | |
|---|--|-----------|----|----------|----|
| | | Кол-во | % | Кол-во | % |
| 1 | Полное дерево решения | 110 | 73 | 63 | 79 |
| 2 | Полное дерево решения с множеством потомков в узле | 84 | 56 | 50 | 63 |
| 3 | Компактное дерево решения | 90 | 60 | 52 | 65 |
| 4 | Компактное дерево решения с множеством потомков в узле | 82 | 55 | 36 | 45 |
| 5 | Полное дерево решения с тремя потомками в узле | 79 | 53 | 40 | 50 |
| 6 | Компактное дерево решения с тремя потомками в узле | 65 | 43 | 48 | 60 |

Как видно из результатов табл. 1, целесообразным является использование «полное (бинарное) дерево решения». Полное бинарное дерево, построенное без применения жестких мер по обрезанию ветвей, применяет 12 предикторных переменных, состоит из 140 узлов и использует 109 логических правил. Фрагмент «Дерева решений» для диагностики гиперплазии эндометрии, полипа цервикального канала и полипа эндометрии представлено на рис. 1.

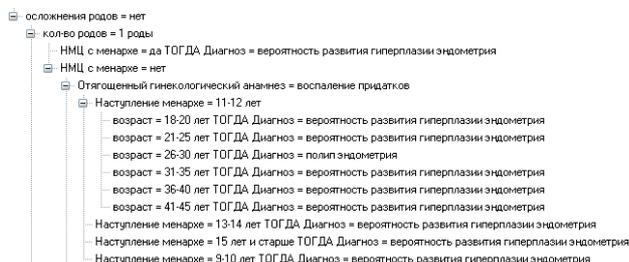


Рис. 1. Фрагмент «Дерева решений» по классификации гинекологических заболеваний

Просмотр «дерева решений» позволяет определить, какие факторы являются более значимыми (верхние узлы дерева), а какие вообще не оказывают влияния (отсечены алгоритмом).

В табл. 2 приведены наиболее значимые признаки и процентная зависимость выходного поля от входных факторов.

Таблица 2

Значимость атрибутов

| Атрибут | Значимость, % |
|--------------------------------------|---------------|
| Отягощенный гинекологический анамнез | 21,46 |
| Возраст | 19,381 |
| Наступление менархе | 15,078 |
| Отягощенный соматический анамнез | 9,597 |
| Кол-во родов | 8,203 |
| Кол-во беременностей | 7,575 |
| Кол-во абортгов | 5,681 |
| Гормональное лечение | 4,71 |
| НМЦ в анамнезе | 4,075 |
| НМЦ с менархе | 2,635 |
| Осложнения родов | 1,607 |
| Отягощенный гинекологический анамнез | 21,46 |

Для постановки диагноза «вероятность развития гиперплазии эндометрия» построенным «деревом решения» было сгенерировано 51 правил: 16 правил со 100 % достоверностью (из них с поддержкой 2 % 4 правила; с 1,33 % 4 правила и с 0,67 % 8 правил); 1 правило с 75 % достоверностью и поддержкой 2,67 %; 2 правила с 66,67 % достоверностью и поддержкой 2 %; 12 правил с 50 % достоверностью (из них с поддержкой 2,67 % 1 правило и с 1,33 % 11 правил); 1 правило с 33,33 % достоверностью и поддержкой 2 %; 19 правил без поддержки достоверности.

Для постановки диагноза «полип цервикального канала» было сформировано 36 правил: 13 правил со 100 % достоверностью (из них с поддержкой 2 % 1 правило; с 1,33 % 5 правил и с 0,67 % 7 правил); 5 правил с 66,67 % достоверностью и поддержкой 2 %; 2 правила с 50 % достоверностью и поддержкой 1,33 %; 16 правил без поддержки достоверности.

Для постановки диагноза «полип эндометрии» было сформировано 22 правила: 7 правил со 100 % достоверностью (из них с поддержкой 3,33 % 1 правило; с 1,33 % 1 правило и с 0,67 % 5 правил); 1 правило с 80 % достоверностью и поддержкой 3,33 %; 2 правила с 75 % достоверностью и поддержкой 2,67 %; 4 правила с 66,67 % достоверностью и поддержкой 2 %; 1 правило с 57,14 % достоверностью и поддержкой 4,67 %; 7 правил без поддержки достоверности.

Апробация построенной модели была проведена на тестовой выборке: неправильный диагноз был поставлен семи пациенткам с вероятностью развития гиперплазии эндометрии, трем пациенткам с полипом цервикального канала и восьми пациенткам с полипом эндометрии. Таким образом, достоверность постановки диагноза по методу «деревьев решений» составляет 77,5 %, а именно 82,05 %, 76,92 %, и 71,43 % для развития гиперплазии эндометрии, полипа цервикального канала и полипа эндометрии соответственно.

Для построения дискриминантных классификационных функций исходные данные о пациентках были разбиты на 2 группы, на основе первой группы (115 пациенток) строились функции Фишера, а достоверность построенных классификационных моделей оценивалась с помощью контрольной группы, состоящей также из 115 пациенток.

Классификационные функции Фишера для определенного вида патологии эндометрия определяются следующим образом:

$$Y_1 = -54,5 + 17,0 \cdot X_1 + 10,8 \cdot X_2 - 22,1 \cdot X_3 + 12,5 \cdot X_4 - 14,4 \cdot X_5 + 11,6 \cdot X_6 + 12,7 \cdot X_7 + 2,1 \cdot X_8 + 47,8 \cdot X_9 - 1,7 \cdot X_{10} + 1,1 \cdot X_{11} - 6,4 \cdot X_{12},$$

$$Y_2 = -28,8 + 15,5 \cdot X_1 + 7,6 \cdot X_2 - 19,8 \cdot X_3 + 13,4 \cdot X_4 - 13,7 \cdot X_5 + 6,6 \cdot X_6 + 8,6 \cdot X_7 + 4,3 \cdot X_8 + 26,9 \cdot X_9 - 0,9 \cdot X_{10} + 0,4 \cdot X_{11} - 5,3 \cdot X_{12},$$

$$Y_3 = -21,9 + 6,3 \cdot X_1 + 5,5 \cdot X_2 - 4,1 \cdot X_3 + 0,2 \cdot X_4 - 5,7 \cdot X_5 + 3,7 \cdot X_6 + 8,5 \cdot X_7 +$$

$$+0,5 \cdot X_8 + 26,6 \cdot X_9 - 1,1 \cdot X_{10} + 0,8 \cdot X_{11} - 3,0 \cdot X_{12},$$

где, Y_1 – диагноз «гиперплазия эндометрия»; Y_2 – диагноз «полип эндометрия»; Y_3 – диагноз «полип цервикального канала»; X_1 – вид аборта; X_2 – возраст; X_3 – количество беременностей; X_4 – количество родов; X_5 – количество аборт; X_6 – осложнения родов; X_7 – наступление менархе; X_8 – НМЦ в анамнезе; X_9 – НМЦ в менархе; X_{10} – отягощенный гинекологический анамнез; X_{11} – отягощенный соматический анамнез; X_{12} – гормональное лечение. Значение критерия Уилкса: $\Lambda=0,06947$, что свидетельствует об оптимальном различии между классами заболеваний. Анализ контрольной группы показал, что достоверность полученных классификационных моделей на основе дискриминантного анализа составляет 85,5 %.

На следующем этапе исследования было проведено построение нейросетевой модели для оценки состояния развития гиперпластических процессов эндометрия у пациенток. Для построения нейросетевой модели использовался многослойный перцептрон, с 3-мя скрытыми слоями, с 10 нейронами в каждом слое, где на вход сети подаются значения 12 признаков, а на выходе результативного слоя фиксируются данные о виде патологии эндометрия.

Так как рассматриваемые показатели, используемые для постановки диагноза развития патологий эндометрия представляют собой величины, имеющие разные единицы измерения, то перед их подачей на вход сети, они нормируются в диапазоне [-1, 1].

В качестве нелинейного элемента нейрона используется нелинейный функциональный сигмоидный преобразователь $f(A)=A/(c+|A|)$, где A - выход сумматора нейрона, а константа c - параметр крутизны сигмоиды.

В результате построения нейронной сети была определена значимость каждого рассматриваемого признака. Диаграмма значимости признаков приведена на рис. 2.

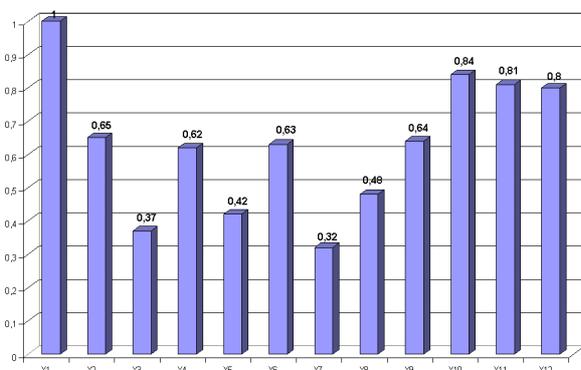


Рис. 2. Значимость признаков при определении гиперпластических процессов эндометрия

Как видно из рис.2 наиболее значимыми признаками при постановки диагноза развития гиперпластических процессов эндометрия являются: вид

аборта (X_1), отягощенный гинекологический анамнез (X_{10}) и отягощенный соматический анамнез (X_{11}).

На основе тестирования контрольной группы больных было установлено, что точность полученных результатов диагностирования на основе нейросетевого моделирования составляет 93,9 %.

Таким образом, полученные результаты нейросетевого моделирования способствуют повышению эффективности диагностики гиперпластических процессов эндометрия.

На рис. 3 представлен интерфейс автоматизированной информационной системы диагностики гиперпластических процессов эндометрия.

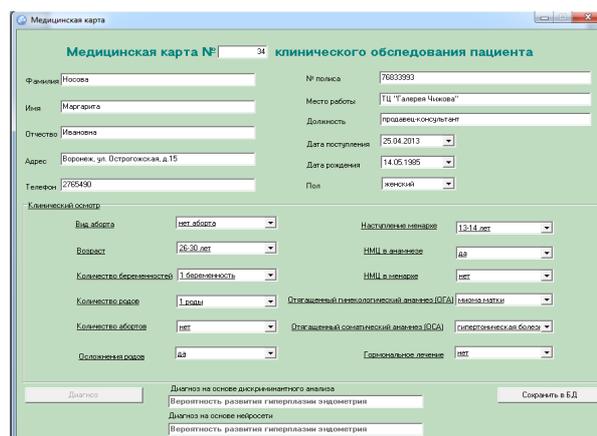


Рис. 3. Интерфейс заполнения медицинской карты с постановкой диагноза

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных моделей возможна постановка предварительного диагноза развития гиперпластических процессов эндометрия для каждой пациентки, что может служить в качестве интеллектуальной поддержки принятия решений для практикующего врача.

Литература

1. Хоц, Е.С. Факторы риска развития гиперпластических процессов эндометрия [Текст] / Е.С. Хоц, В.И. Бычков, М.В. Фролов // Журнал теоретической и практической медицины. – 2008. Т.6. - №1 – С. 32-35.
2. Новикова, Е.И. Моделирование биомедицинских систем [Текст] / Е.И. Новикова, О.В. Родионов, Е.Н. Корвин. - Воронеж: ВГТУ, 2008. – 196 с.
3. Родионов, О.В. Построение имитационной модели диагностики и лечения гиперпластических процессов эндометрия на основе сетей Петри [Текст] / О.В. Родионов, М.А. Сергеева, А.К. Сидорова // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2015. – Т.14.- №. 3. – С. 574-576.
4. Родионов, О.В. Процедура оценки состояния развития патологии эндометрия у женщин на основе нейростатистического моделирования [Текст] / О.В. Родионов, М.А. Сергеева // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2016. – Т.15. - №. 1. – С. 110-114.

5. Коровин, Е.Н. Методы обработки биомедицинских данных [Текст] / Е.Н. Коровин, О.В. Родионов. - Воронеж: ВГТУ, 2007. – 152 с.

6. Коровин, Е.Н. Разработка информационно-программного обеспечения подсистемы диагностики ги-

перпластических процессов эндометрия на основе дискриминантного анализа [Текст] / Е.Н. Коровин, М.А. Сергеева, А.К. Сидорова // Управление в биомедицинских, социальных и экономических системах: межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж: ВГТУ, 2013. – С. 54-58.

Воронежский государственный технический университет

DEVELOPMENT OF AUTOMATED INFORMATION SYSTEMS DIAGNOSIS AND CHOICE OF TREATMENT ENDOMETRIAL HYPERPLASIA

E.N. Korovin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: korovin@saums.vorstu.ru

O.V. Rodionov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: rodionov@saums.vorstu.ru

M.A. Sergeeva, assistant, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: saums@vorstu.ru

The article deals with the construction of the automated information system of diagnosis and the type of treatment of endometrial hyperplastic processes based on statistical and neural network modeling. To build mathematical models of diagnosis and choice of treatment were used statistical data on 230 patients with endometrial hyperplasia: endometrial hyperplasia, endometrial polyp and the polyp of the cervical canal. To improve the efficiency of diagnostics of hyperplastic processes of the endometrium and assessment of the significance of clinical signs in the first stage of the study it is proposed to use a method of constructing a decision tree. The result was built several decision trees: full binary, complete with many descendants in the node a compact (binary), compact with many descendants in the node. The analysis of the obtained results was selected a complete binary tree of solutions". Testing of the constructed model was performed on the test sample, where the accuracy of diagnosis by the method of "decision trees" is 77.5 %. In the next phase of the study were obtained classification Fisher's function to supply the preliminary diagnosis for each type of endometrial pathology. The analysis and testing of classification models, it was found that the accuracy of diagnostic models based on discriminant analysis is of 85.5 %. For specification of the diagnosis in the second stage of the study built a neural network model, where it was used the neural network in the form of multi-layer perceptron where the input sensor layer serves the values of the 12 signs of illness, and the output resultant layer obtained data on the type of hyperplastic process of the endometrium. Based on testing of the control group patients it was found that the accuracy of diagnosis based on neural network modeling is 93.9 %. The resulting model-based method build a decision tree, discriminant analysis and neroserial simulation are used in the automated information system, which contribute to improve the diagnosis and choice of treatment of endometrial hyperplastic processes

Key words: information systems, diagnosis, treatment, gynecology

References

1. Hotz E.S., Bychkov V.I., Frolov M.V. Faktory riska razvitija giperplasticheskikh processov jendometrija [Factors of risk for development of endometrial hyperplastic processes] // Journal of theoretical and practical cal medicine. – M., 2008. - Vol. 6. N. 1 P. 32-35.

2. Novikova E.I., Rodionov O.V., Korovin E.N. Modelirovanie biomedicinskih sistem [Modeling of biomedical systems] // Voronezh: VSTU, 2008. – 196 p.

3. Rodionov O.V., Sergeeva M.A., Sidorova A.K. Postroenie imitacionnoj modeli diagnostiki i lechenija giperplasticheskikh processov jendometrija na osnove setej Petri [Construction of a simulation model of diagnosis and treatment of endometrial hyperplastic processes based on Petri nets] // System analysis and management in biomedical systems – M., 2015. – Vol. 14. N. 3. – P. 574-576.

4. Rodionov O.V., Sergeeva M.A. Procedura ocenki sostojanija razvitija patologii jendometrija u zhenshhin na osnove nejrostatisticheskogo modelirovanija [Procedure of assessing the development of endometrial pathology in women on the basis of neurostatistical modeling] // System analysis and management in biomedical systems – M., 2016. – Vol. 15. N 1. – P. 110-114.

5. Korovin E.N., Rodionov O.V. Metody obrabotki biomedicinskih dannyh [Methods of processing of biomedical data] // Voronezh: VSTU, 2007. – 152 p.

6. Korovin E.N., Sergeeva M.A., Sidorova A.K. Razrabotka informacionno-programmnogo obespechenija podsystemy diagnostiki giperplasticheskikh processov jendometrija na osnove diskriminantnogo analiza [The development of information and software subsystem of diagnostics of hyperplastic processes of the endometrium based on discriminant analysis] / Management in biomedical, social and economic systems – Voronezh: VSTU. 2013. – P. 54-58.

УПРАВЛЯЕМАЯ ИНЕРЦИАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ МУЛЬТИСИСТЕМА

В.П. Напольский, С.В. Слесаренок, И.П. Шепеть, А.В. Захарин, В.И. Рубинов

Анализ состояния и перспектив развития инерциальных датчиков позволяет сделать вывод о том, что их развитие в настоящее время находится на таком этапе, когда существующие инерциальные датчики уже не удовлетворяют требованиям по стоимости и точности. Перспективным методом повышения точности любых измерительных систем является метод функционального мультиплексирования путем пространственного управления измерителями векторных величин. Для его реализации используются два блока чувствительных элементов, которые включают в свой состав по три одноступенчатых гироскопа и акселерометра. С помощью устройства управления блоки чувствительных элементов располагаются в пространстве таким образом, чтобы их векторы погрешностей измерения были противоположно направленными. Данный метод управления векторами погрешностей теоретически позволяет повысить точность измерения векторных параметров мультисистемы с трехкомпонентными измерителями в 2,5 – 3,5 раза в сравнении с обычным усреднением показаний чувствительных элементов. Разработанная программа управления позволяет формировать рабочие сигналы, обеспечивающие движение к минимальному значению выходной ошибки. В этом случае сумма модулей векторов погрешностей будет минимальной и дисперсия ошибки навигационных измерений значительно уменьшится. Алгоритм функционирования управляемой инерциальной навигационной мультисистемы позволяет компенсировать не только основные погрешности чувствительных элементов, но и ошибки определения ориентации блока чувствительных элементов

Ключевые слова: инерциальная навигационная система, блок чувствительных элементов, пилотажно-навигационный комплекс

Введение

Инерциальная навигационная система на борту аэродинамических объектов (АО) является первичным источником пилотажной и навигационной информации. Она, в отличие от спутниковых, является источником полного вектора состояния подвижного объекта (координаты, скорости, аэродинамические углы).

Однако инерциальный метод счисления пути не позволяет достигнуть высокой точности в определении пилотажно-навигационных параметров. Ошибки определения координат местоположения АО могут составлять от 5 до 12 км за 1 час полета [1].

Целью работы является повышение точности автономного определения навигационных параметров полета путем алгоритмического обеспечения инерциальной навигационной

мультисистемы, состоящей из двух или более резервированных ИНС.

1. Мультиплексирование ИНС с двухкомпонентными измерителями

Если ориентировать измерители ИНС таким образом, чтобы векторы, связанные с осями чувствительности измерителей не были коллинеарными, и не было при управлении более двух из этих векторов компланарных, то такие векторы являются линейно не зависимыми и обеспечивают функциональное мультиплексирование.

Функциональное мультиплексирование путем пространственного управления блоками чувствительных элементов (БЧЭ), используемых для измерения векторных величин, позволяет управлять вектором погрешностей.

Чувствительными элементами современных ИНС являются датчики угловых скоростей (ДУС) – гироскопы, и датчики кажущегося ускорения – акселерометры. Анализ состояния и перспектив развития инерциальных датчиков позволяет сделать вывод, что их развитие в настоящее время находится на таком этапе, когда существующие инерциальные датчики уже не удовлетворяют требованиям по точности [2]. Поэтому актуальным направлением в повышении точностных характеристик ИНС являются структурно-алгоритмические методы повышения точности ИНС, основанные на мультиплексировании систем.

Ошибки измерения векторных величин многокомпонентными чувствительными элементами в виде векторов в соответствующих системах координат можно представить в виде рис. 1 [5].

Напольский Виктор Петрович - ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», канд. техн. наук, доцент, тел. 8(910) 2451725, e-mail: nppvp@mail.ru

Слесаренок Сергей Владимирович – ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», канд. техн. наук, доцент, тел. 8(919) 2493061, e-mail: sergulik@mail.ru

Шепеть Игорь Петрович – ТИС «ДГТУ» (г. Ставрополь), канд. техн. наук, профессор, тел. 8(919) 7476598, e-mail: sergulik@mail.ru

Захарин Александр Викторович – Краснодарское ВВАУЛ, канд. техн. наук, старший преподаватель, тел. 8(918) 4451590, e-mail: Siralex13@yandex.ru

Рубинов Владимир Иванович – ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», канд. техн. наук, заместитель начальника кафедры, тел. 8(980) 3481953, e-mail: rubinov777@mail.ru

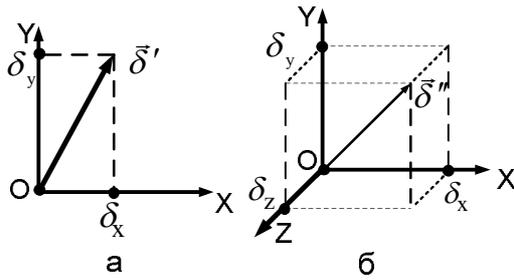


Рис. 1. Погрешности многокомпонентных измерителей:

- а) 2-х компонентный измеритель;
б) 3-х компонентный измеритель,

Длины векторов ошибок измерения двух и трехкомпонентных измерителей определяются:

$$|\delta'| = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2}; |\delta''| = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2 + \delta_z^2}. \quad (1)$$

Дисперсия ошибки измерения векторной величины 2-х и 3-х компонентными ЧЭ соответственно:

$$D[\delta'] = M[|\delta'|^2] = M[\delta_x^2] + M[\delta_y^2] = 2D_c; \quad (2)$$

$$D[\delta''] = M[\delta_x^2] + M[\delta_y^2] + M[\delta_z^2] = 3D_c.$$

где D_c – дисперсия случайного вектора.

Наиболее простым методом повышения точности является способ структурной избыточности с последующим осреднением результатов измерения, где дисперсия ошибки для 2-х и 3-х компонентной измерительной системы соответственно:

$$D[\delta'_{усб}] = \frac{D[\delta']}{\sqrt{2}} = \frac{2D_c}{\sqrt{2}} \approx 1,41D_c; \quad (3)$$

$$D[\delta''_{усб}] = \frac{D[\delta'']}{\sqrt{2}} = \frac{3D_c}{\sqrt{2}} \approx 2,12D_c.$$

При рассмотрении системы, состоящей из 2-х компонентных измерителей, ориентированных таким образом, что направление векторов погрешностей противоположны (рис. 2), представим векторы погрешностей измерителей в виде комплексных случайных величин:

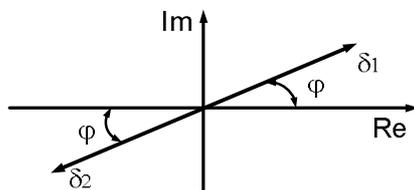


Рис. 2. Векторы погрешностей 2-х компонентной системы

$$\delta_1 = \delta_{x1} + j\delta_{y1}, \quad \delta_2 = \delta_{x2} + j\delta_{y2}. \quad (4)$$

Модули и аргументы данных комплексных величин соответственно:

$$r_1 = \sqrt{\delta_{x1}^2 + \delta_{y1}^2}, \quad r_2 = \sqrt{\delta_{x2}^2 + \delta_{y2}^2}; \quad (5)$$

$$\varphi_1 = \arctg \frac{\delta_{y1}}{\delta_{x1}}, \quad \varphi_2 = \arctg \frac{\delta_{y2}}{\delta_{x2}} = \pi + \varphi_1.$$

Пользуясь формулами Эйлера и учитывая

выражения значений модулей и аргументов данных комплексных величин, получим:

$$\delta_1 = r_1 e^{j\varphi_1} = r_1 \cos \varphi_1 + jr_1 \sin \varphi_1; \quad (6)$$

$$\delta_2 = r_2 e^{j(\pi+\varphi_1)} = -r_2 \cos \varphi_1 - jr_2 \sin \varphi_1.$$

При комплексной обработке информации способом осреднения:

$$\delta = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} = \frac{r_1 - r_2}{2} \cos \varphi_1 + j \frac{r_1 - r_2}{2} \sin \varphi_1 = \quad (7)$$

$$= \frac{1}{2} \left(\sqrt{\delta_{x1}^2 + \delta_{y1}^2} - \sqrt{\delta_{x2}^2 + \delta_{y2}^2} \right) e^{j\varphi_1}.$$

Для удобства вычислений обозначим 2δ через δ' и определим дисперсию:

$$D[\delta'] = M[|\delta'|^2] = \quad (8)$$

$$= M \left[\left(\sqrt{\delta_{x1}^2 + \delta_{y1}^2} - \sqrt{\delta_{x2}^2 + \delta_{y2}^2} \right)^2 \right]$$

$$= 4D_c - 2M[|\delta_1||\delta_2|].$$

При условии некоррелированности ошибок измерения δ_1 и δ_2 :

$$M[|\delta_1||\delta_2|] = M[|\delta_1|] \cdot M[|\delta_2|]. \quad (9)$$

Определим отдельно значения сомножителей:

$$M[|\delta_1|] = M \left[\left(\delta_{x1}^2 + \delta_{y1}^2 \right)^{1/2} \right] = M[R_2] \quad (10)$$

Так как δ_{x1} и δ_{y1} – одинаково распределенные нормальные случайные величины с характеристиками $m_\delta = 0$ и $\sigma_\delta = \sigma_c$, то:

$$M[R_2] = \sigma_c \sqrt{2\Gamma(1,5)/\Gamma(1)}, \quad (11)$$

где $\Gamma(k)$ – гамма-функция, причем

$$\Gamma(1) = 1, \quad \Gamma\left(k + \frac{1}{2}\right) = \frac{\sqrt{\pi}(2k-1)!!}{2^k}.$$

Окончательно, дисперсия и СКО, соответственно:

$$D[\delta] = \frac{4D_c - 2\sqrt{\pi}D_c}{4} \approx 0,114D_c = \frac{D_c}{8,878}; \quad (12)$$

$$\sigma_\delta = \sqrt{0,114D_c} = 0,337\sigma_c = \frac{\sigma_c}{2,965}.$$

Данный способ управления векторами погрешностей теоретически позволяет повысить точность измерения векторного параметра почти два раза по сравнению со способом структурной избыточности с последующим осреднением результатов измерения [3].

2. Мультиплексирование ИНС с трехкомпонентными измерителями

При рассмотрении 3-х компонентных измерителей векторы ошибок измерения образуют собой плоскость Φ (рис. 3).

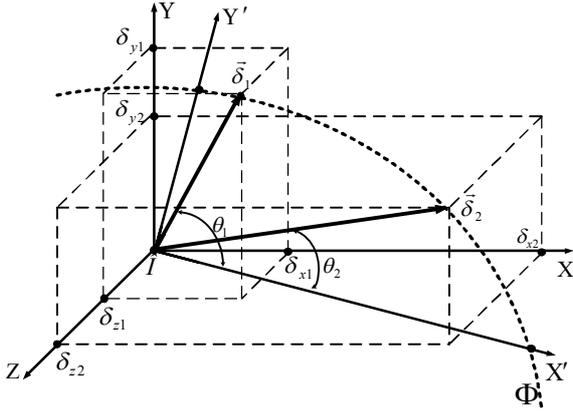


Рис. 3. Векторы погрешностей 3-х компонентной измерительной системы

Тогда данные векторы можно представить в плоскости Φ в системе координат OY^1X^1 в виде случайных комплексных величин в форме Эйлера:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= d_1 e^{j\theta_1} = d_1 \cos \theta_1 + jd_1 \sin \theta_1; \\ \delta_2 &= d_2 e^{j\theta_2} = d_2 \cos \theta_2 + jd_2 \sin \theta_2, \end{aligned} \quad (13)$$

где $d_1 = \sqrt{\delta_{x_1}^2 + \delta_{y_1}^2 + \delta_{z_1}^2}$, $d_2 = \sqrt{\delta_{x_2}^2 + \delta_{y_2}^2 + \delta_{z_2}^2}$ – длины векторов δ_1 и δ_2 в системе координат $OXYZ$; θ_1 и θ_2 – аргументы комплексных величин.

Векторы ошибок δ_1 и δ_2 должны быть развернуты в плоскости Φ в противоположных направлениях, тогда: $\theta_2 = \pi + \theta_1$, и $\delta_2 = -d_2 \cos \theta_2 - jd_2 \sin \theta_2$ (рис. 4).

При комплексной обработке информации способом осреднения ошибка мультисистемы будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} = \frac{d_1 - d_2}{2} e^{j\theta_1} = \\ &= \frac{1}{2} \left(\sqrt{\delta_{x_1}^2 + \delta_{y_1}^2 + \delta_{z_1}^2} - \sqrt{\delta_{x_2}^2 + \delta_{y_2}^2 + \delta_{z_2}^2} \right) e^{j\theta_1}. \end{aligned} \quad (14)$$

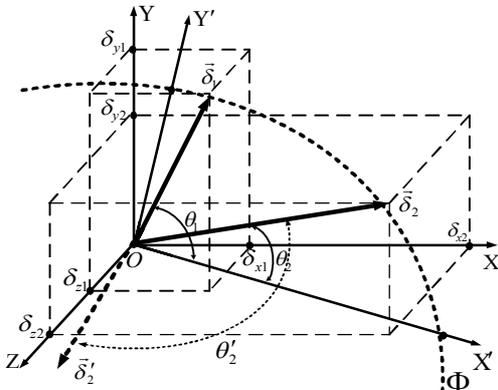


Рис. 4. Компенсация погрешностей трехкомпонентной системы

Обозначим 2δ через δ'' . Определим дисперсию данной величины:

$$\begin{aligned} D[\delta''] &= M[|\delta''|^2] = \\ &= M\left[\left(\sqrt{\delta_{x_1}^2 + \delta_{y_1}^2 + \delta_{z_1}^2} - \sqrt{\delta_{x_2}^2 + \delta_{y_2}^2 + \delta_{z_2}^2}\right)^2\right] = \\ &= 6D_C - 2M[|\delta_1||\delta_2|]. \end{aligned} \quad (15)$$

При условии некоррелированности ошибок измерения δ_1 и δ_2 , получим:

$$M[|\delta_1||\delta_2|] = M[|\delta_1|] \cdot M[|\delta_2|]. \quad (16)$$

Определим отдельно значения сомножителей:

$$\begin{aligned} M[|\delta_1|] &= M\left[\sqrt{\delta_{x_1}^2 + \delta_{y_1}^2 + \delta_{z_1}^2}\right] = \\ &= \sigma_c \sqrt{2\Gamma(2)/\Gamma(1,5)} = 2\sigma_c \sqrt{\frac{1}{\sqrt{\pi}}}; \end{aligned} \quad (17)$$

$$2M[|\delta_1||\delta_2|] = 8\sigma_c^2 \frac{1}{\sqrt{\pi}} = \frac{8D_C}{\sqrt{\pi}}.$$

Окончательно, определяя дисперсию, получим:

$$\begin{aligned} D[\delta] &= \frac{D[\delta'']}{4} = \frac{6D_C - 8D_C(\sqrt{\pi})^{-1}}{\sqrt{\pi}} \approx \\ &\approx 0,372D_C \approx \frac{D_C}{2,688} \end{aligned} \quad (18)$$

Данный метод управления векторами погрешностей теоретически позволяет повысить точность измерения векторного параметра мультисистемой 3-х компонентных измерителей в 3 – 4 раза в сравнении с обычным осреднением показаний измерителей.

Математическая модель функционирования ИНС с мультиплексированием включает динамические и кинематические уравнения [5].

Динамические уравнения рассматриваемой ИНС реализуют 3-х компонентную систему, в которой координаты (φ , λ , ε , H) и составляющие путевой скорости полета АО (V_X , V_Y , V_Z) определяются интегрированием уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} &= Q^{-1}(V_X \sin \varepsilon + V_Y \cos \varepsilon); \\ \dot{\lambda} &= G^{-1}(V_X \cos \varepsilon - V_Y \sin \varepsilon)/\cos \varphi; \\ \dot{\varepsilon} &= G^{-1}(V_Y \sin \varepsilon + V_X \cos \varepsilon) \operatorname{tg} \varphi; \\ \dot{H} &= V_Z - q_1(H - H_\delta); \\ \dot{V}_X &= \alpha_X + 2V_Y u_Z - V_Z(\Omega_Y + 2u_Y); \\ \dot{V}_Y &= \alpha_Y + V_Z(\Omega_Y + 2u_Y) - 2V_X u_Z; \\ \dot{V}_Z &= \alpha_Z + V_X(\Omega_Y + 2u_Y) + V_Y(\Omega_X + 2u_X) \\ &\quad - g_e \left(1 - 2\frac{H}{\alpha} + \frac{3}{4}e^2 \sin^2 \varphi\right) - q_2(H - H_\delta), \end{aligned} \quad (19)$$

где α_X , α_Y , α_Z – проекции кажущегося ускорения ВС; u_X , u_Y , u_Z – проекции угловой скорости Земли; Ω_X , Ω_Y , Ω_Z – проекции относительной угловой скорости сопровождающего трехгранника

$MXYZ$; H_δ – барометрическая высота; α – большая полуось земного эллипсоида; e – эксцентриситет; g_e – ускорение силы тяжести на экваторе; G – радиус кривизны сечения эллипсоида плоскостью, проходящей через геодезическую вертикаль места; Q – радиус кривизны сечения эллипсоида меридианной плоскостью [4].

Акселерометры измеряют ускорение АО в подвижной системе координат (СК) $X_2 Y_2 Z_2$. Необходимо знать ориентацию осей чувствительности акселерометров относительно навигационного трехгранника $X Y Z$. С этой целью решаются кинематические уравнения Пуассона. Системы координат (СК), используемые при разработке функционального алгоритма представлены на рис. 5 [6]: $0X_3 Y_3 Z_3$ – Земная (ЗСК); $0X_g Y_g Z_g$ – навигационная (НСК); $0XYZ$ – правая прямоугольная СК, связанная с АО. Центр O совмещен с центром масс АО, ось OX является продольной осью АО, ось OY расположена ортогонально оси OX в вертикальной плоскости симметрии АО; $0X_u Y_u Z_u$ – связанная с БЧЭ система координат.

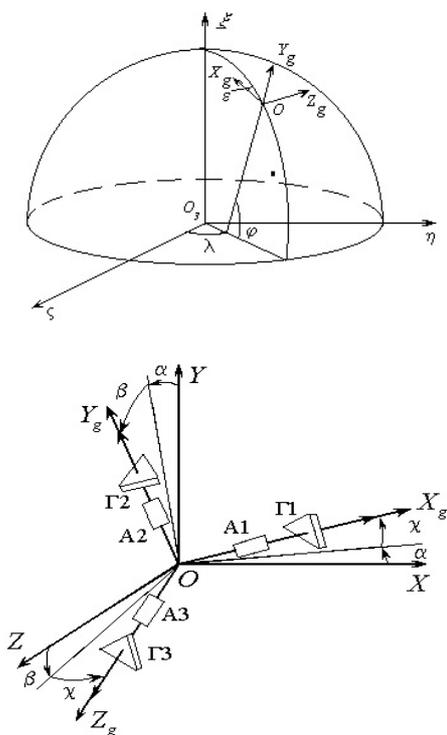


Рис. 5. Системы координат: а) ЗСК и НСК; б) связанные СК

Рассмотрим алгоритм функционирования ИНС, состоящей из БЧЭ1 и БЧЭ2, причем БЧЭ1 равномерно вращается относительно горизонтальной оси OX_g НСК, а БЧЭ2 равномерно

вращается относительно горизонтальной оси OZ_g НСК. Определим дополнительно две СК: $0X_1 Y_1 Z_1$ – связанная с БЧЭ1; $0X_2 Y_2 Z_2$ – связанная с БЧЭ2. Положение БЧЭ относительно НСК однозначно определяется тремя углами Эйлера: для БЧЭ1 $\alpha_1 \beta_1 \chi_1$; для БЧЭ2 $\alpha_2 \beta_2 \chi_2$.

3. Алгоритм функционирования инерциальной навигационной мультисистемы

Всеширотный алгоритм для определения навигационных параметров трехкомпонентной инерциальной навигационной мультисистемы (ИНМС) состоит из следующих операций:

1) Формирование векторов угловых скоростей для вычисления матриц ориентации. Законы вращения системы для БЧЭ1 и БЧЭ2 соответственно:

$$\alpha(t) = \omega_\alpha t; \beta(t) = \omega_\beta t. \quad (20)$$

Векторы угловых скоростей для вычисления матриц ориентации:

$$\omega_1^* = [\omega_{x1} \omega_{z21} \omega_{y1}]^T; \omega_2^* = [\omega_{x12} \omega_{z2} \omega_{y2}]^T. \quad (21)$$

где ω_{z21} , ω_{x12} – проекции показаний ДУС одного БЧЭ на ось вращения другого БЧЭ.

Данные проекции определяются:

$$\omega_{z21} = A_{21} \omega_2; \omega_{x12} = A_{12} \omega_1. \quad (22)$$

2) Вычисление МНК перехода из СК, связанных с БЧЭ1 и БЧЭ2, в НСК:

$$\begin{aligned} \dot{A}_1 &= A_1 [\omega_1^*] - [\omega_g] A_1; \\ \dot{A}_2 &= A_2 [\omega_2^*] - [\omega_g] A_2, \end{aligned} \quad (23)$$

где A_1 – МНК перехода от $0X_1 Y_1 Z_1$, а A_2 – МНК перехода от $0X_2 Y_2 Z_2$ к $0X_g Y_g Z_g$.

3) Обозначим систему координат: $0X_g Y_g Z_g$ через S ; $0X_1 Y_1 Z_1$ – через $S1$, $0X_2 Y_2 Z_2$ – через $S2$. Тогда при условии, что $S1 = A_2 S2$; $S2 = A_1 S1$ получим:

$$S = A_2 A_1 S1, \quad (24)$$

$$\text{или } S = A_1 S1, \text{ тогда } A_2 A_1 S1 = A_1 S1. \quad (25)$$

$$\text{Из равенства (25) получим } A_{12} = A_2^T A_1. \quad (26)$$

$$\text{По аналогии запишем: } A_{21} = A_1^T A_2. \quad (27)$$

4) Вектор проекций кажущегося ускорения в НСК:

$$\bar{a}_{g1} = A_1 \bar{a}_1; \bar{a}_{g2} = A_2 \bar{a}_2, \quad (28)$$

Для вычисления параметров ориентации по показаниям БЧЭ необходимо знать МНК S перехода от связанной с АО СК к связанной с БЧЭ СК, которая вычисляется по измеренным значениям углов $\chi_1 \chi_2 \chi_3$ вращения БЧЭ относительно корпуса АО.

По значениям матриц S и A_1 определяется

МНК D перехода от связанной с АО системы координат к НСК:

$$D = A_1 C. \quad (29)$$

Углы ориентации ВС: (тангаж \mathcal{G} , крен γ , курс ψ) вычисляются соответственно:

$$\mathcal{G} = \text{Arctg} \frac{d_{31}}{\sqrt{d_{33}^2 + d_{32}^2}}; \gamma = \text{Arctg} \frac{d_{33}}{d_{32}}; \quad (30)$$

$$\psi = \text{Arctg} \frac{d_{11}}{d_{21}}.$$

Для автокомпенсации погрешностей с пространственным управлением БЧЭ с помощью устройства управления осуществляется изменение взаимного положения БЧЭ в пространстве таким образом, чтобы расположить векторы погрешностей измерения в противоположных направлениях. Тогда алгоритм определения навигационных параметров управляемой инерциальной навигационной мультисистемы (УИНМС) будет состоять из операций:

1) Вычисление МНК перехода из системы координат, связанной с БЧЭ в НСК:

$$\dot{A}_1 = A_1 (\alpha_1 \beta_1 \chi_1) [\omega_u] - [\omega_g] A_1 (\alpha_1 \beta_1 \chi_1); \quad (31)$$

$$\dot{A}_2 = A_2 (\alpha_2 \beta_2 \chi_2) [\omega_u] - [\omega_g] A_2 (\alpha_2 \beta_2 \chi_2).$$

где $[\alpha_2 \beta_2 \chi_2]^T = u$ – вектор управления пространственным положением БЧЭ2;

A_1 – МНК перехода от $OX_{u1}Y_{u1}Z_{u1}$ к $OX_gY_gZ_g$;

A_2 – МНК перехода от $OX_{u2}Y_{u2}Z_{u2}$ к $OX_gY_gZ_g$;

$OX_{u1}Y_{u1}Z_{u1}$ – система координат, связанная с БЧЭ1;

$OX_{u2}Y_{u2}Z_{u2}$ – система координат, связанная с БЧЭ2.

2) Пересчет показаний акселерометров в НСК:

$$\bar{a}_{gk} = A_k \bar{a}_{uk}, \quad (32)$$

где \bar{a}_{gk} – вектор проекций кажущегося ускорения на оси НСК;

\bar{a}_{uk} – вектор показаний акселерометров.

3) Вычисление горизонтальных составляющих путевых скоростей:

$$\dot{V}_{X_{gk}} = a_{X_{gk}} + (\Omega_{Z_{gk}} + 2\omega_{Z_{gk}}) V_{Y_{gk}} - (\Omega_{Y_{gk}} + 2\omega_{Y_{gk}}) V_{Z_{gk}};$$

$$\dot{V}_{Z_{gk}} = a_{Z_{gk}} + (\Omega_{X_{gk}} + 2\omega_{X_{gk}}) V_{Y_{gk}} - (\Omega_{Y_{gk}} + 2\omega_{Y_{gk}}) V_{X_{gk}}.$$

где $\Omega_{X_{gk}}, \Omega_{Z_{gk}}, \Omega_{Y_{gk}}$ – составляющие относительных угловых скоростей навигационного трехгранника; $\omega_{X_{gk}}, \omega_{Z_{gk}}, \omega_{Y_{gk}}$ – проекции угловой скорости Земли на оси навигационного трехгранника.

4) Вычисление уравнений вертикального канала:

$$\dot{V}_{Y_{gk}} = a_{Y_{gk}} - (\Omega_{Z_{gk}} + 2\omega_{Z_{gk}}) V_{X_{gk}} + (\Omega_{X_{gk}} + 2\omega_{X_{gk}}) V_{Z_{gk}} -$$

$$-g_e \left(1 - 2 \frac{H_k}{a} + 3e^2 b_{33k}^2 \right) - q_2 (H_k - H_0);$$

$$\dot{H}_k = V_{X_{gk}} - q_1 (H_k - H_0),$$

где H_0 – барометрическая высота; a – большая полуось земного эллипсоида; q_2, q_1 – коэффициенты обратной связи; g_e – ускорение на экваторе.

5) Вычисление угловых скоростей НСК:

$$\omega_{X_{gk}} = \omega_{Z_{gk}} + \omega_{Z_{gk}}; \omega_{Y_{gk}} = \omega_{Y_{gk}}.$$

$$v_{X_{gk}} = v b_{23k};$$

$$v_{Z_{gk}} = v b_{13k}; v_{Y_{gk}} = v b_{33k}; \quad (33)$$

где b_{ij} – элементы МНК B перехода от ЗСК к НСК; v – угловая скорость Земли.

6) Вычисление МНК перехода от ЗСК $OX_3Y_3Z_3$ к НСК $OX_gY_gZ_g$:

$$\dot{B}_k = -[\Omega_{gk}] B_k, \quad (34)$$

где $[\Omega_{gk}]$ – кососимметричная матрица.

7) Вычисление географических координат местоположения воздушного объекта:

$$\lambda_k = \text{arctg} \frac{b_{32k}}{b_{31k}} + \frac{\pi}{4} (1 + S_1)(1 - S_2) - \frac{\pi}{4} (1 - S_1)(1 + S_2), \quad (35)$$

где $S_1 = \text{sign} b_{32k}, S_2 = \text{sign} b_{31k}$.

$$\varphi_k = \text{arctg} \frac{b_{33k}}{\sqrt{b_{13k}^2 + b_{23k}^2}}, \left[-\frac{\pi}{2} < \varphi < \frac{\pi}{2} \right]. \quad (36)$$

При $k = 1$ – значения первой ИНС; $k = 2$ – значения второй ИНС.

8) Осреднение результатов географических координат местоположения ВС:

$$\lambda = \frac{1}{2} (\lambda_1 + \lambda_2), \varphi = \frac{1}{2} (\varphi_1 + \varphi_2), \quad (37)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2), H = \frac{1}{2} (H_1 + H_2).$$

Алгоритм определения углов ориентации УИНМС:

9) Определение МНК A_{1k} перехода от связанной с АО к связанной с БЧЭ СК:

10) Определение МНК D_k перехода от связанной с ВС системы координат к НСК:

$$D_k = A_k A_{1k}. \quad (38)$$

11) Вычисление углов ориентации ВС:

$$\mathcal{G}_k = \text{Arctg} \frac{d_{31k}}{\sqrt{d_{33k}^2 + d_{32k}^2}};$$

$$\gamma_k = \text{Arctg} \frac{d_{33k}}{d_{32k}}; \quad (39)$$

$$\psi_k = \text{Arctg} \frac{d_{11k}}{d_{21k}}.$$

При $k = 1$ – значения вычислений первой УИНС; $k = 2$ – второй управляемой ИНС.

12) Осреднение результатов определения углов ориентации В:

$$\mathcal{G} = \frac{1}{2} (\mathcal{G}_1 + \mathcal{G}_2), \gamma = \frac{1}{2} (\gamma_1 + \gamma_2), \psi = \frac{1}{2} (\psi_1 + \psi_2). \quad (40)$$

Каждая из мультисистем при измерении векторных параметров $\vec{\omega}$ и имеет свою случайную ошибку $\Delta \vec{\omega}_1$ и $\Delta \vec{\omega}_2$:

$$\begin{aligned}\vec{\omega} &= \omega_{x_{g_1}} \vec{i}_1 + \omega_{y_{g_1}} \vec{j}_1 + \omega_{z_{g_1}} \vec{k}_1 = \\ &= \omega_{x_{g_2}} \vec{i}_2 + \omega_{y_{g_2}} \vec{j}_2 + \omega_{z_{g_2}} \vec{k}_2; \\ \Delta \vec{\omega}_1 &= \Delta \omega_{x_{g_1}} \vec{i}_1 + \Delta \omega_{y_{g_1}} \vec{j}_1 + \Delta \omega_{z_{g_1}} \vec{k}_1; \\ \Delta \vec{\omega}_2 &= \Delta \omega_{x_{g_2}} \vec{i}_2 + \Delta \omega_{y_{g_2}} \vec{j}_2 + \Delta \omega_{z_{g_2}} \vec{k}_2.\end{aligned}\quad (41)$$

Для выполнения условия автокомпенсации ошибок при управлении БЧЭ получено аналитическое выражение:

$$A^1(\alpha_1, \beta_1, \chi_1) \begin{pmatrix} \omega_{x_{g_1}} + \Delta \omega_{x_1} \\ \omega_{y_{g_1}} + \Delta \omega_{y_1} \\ \omega_{z_{g_1}} + \Delta \omega_{z_1} \end{pmatrix} - A^1(\alpha_2, \beta_2, \chi_2) \begin{pmatrix} \omega_{x_{g_2}} + \Delta \omega_{x_2} \\ \omega_{y_{g_2}} + \Delta \omega_{y_2} \\ \omega_{z_{g_2}} + \Delta \omega_{z_2} \end{pmatrix} \quad (42)$$

Вектор ошибок Δ можно уменьшить при управлении БЧЭ, изменяя углы α_i β_i χ_i до максимального значения модуля векторов, т.е. $[\alpha_1, \beta_1, \chi_1, \alpha_2, \beta_2, \chi_2] = \arg \max \|\Delta\|$. С этой целью выбран экстремальный ЗУ БЧЭ с использованием устройств вычисления градиента и формирования сигналов управления [3]. Применение метода заключается в обеспечении движения БЧЭ в направлении уменьшения мгновенного значения градиента. Скорость изменения переменных при развороте БЧЭ к экстремуму пропорциональна составляющим градиента по соответствующим переменным:

$$\frac{d\alpha_i}{dt} = a \frac{d\|\Delta\|}{d\alpha_i}, \quad \frac{d\beta_i}{dt} = a \frac{d\|\Delta\|}{d\beta_i}, \quad \frac{d\chi_i}{dt} = a \frac{d\|\Delta\|}{d\chi_i}, \quad (43)$$

Зависимость (43) используется для формирования рабочих сигналов управления, обеспечивающих движение к экстремальному значению выходной переменной – модулю вектора ошибок $\|\Delta\|$. При управлении используется метод покоординатного спуска, при котором определяется направление вектора градиента в начальной точке состояния системы. Движение в этом направлении происходит до тех пор, пока частная производная экстремальной функции $\frac{d\|\Delta\|}{d\alpha}$, взятая вдоль указанного направления α , не обратится в нуль. В точке, где частная производная $\frac{d\|\Delta\|}{d\alpha}$ обращается в нуль, вновь определяется направление вектора градиента и происходит движение вдоль этого вектора до обращения в нуль частной производной, взятой по новому направлению вектора градиента β , и в точке, где частная производная $\frac{d\|\Delta\|}{d\beta}$ обращается в нуль, вновь определяется направление вектора градиента и происходит движение вдоль этого вектора до обращения в нуль частной производной, и т.д. Закон управления БЧЭ УИНМС:

$$U_{\alpha_i} = ah_{\alpha} \frac{d\|\Delta\|}{d\alpha_i}, U_{\beta_i} = ah_{\beta} \frac{d\|\Delta\|}{d\beta_i}, U_{\chi_i} = ah_{\chi} \frac{d\|\Delta\|}{d\chi_i}, \quad (44)$$

где $a = const$, причем $a > 0$ для экстремума – максимума; h – коэффициент пропорциональности;

Для определения максимальной разности векторов погрешностей мультисистемы, состоящей из двух отдельных БЧЭ, необходимо в ЗУ БЧЭ использовать движение к экстремуму – максимуму [4].

4. Выводы

Алгоритм функционирования УИНМС позволяет определять не только основные погрешности чувствительных элементов, но и ошибки определения ориентации БЧЭ.

Для определения эффективности управляемой мультисистемы были решены ковариационные уравнения для УИНМС и обычной ИНС.

Определено, что применение алгоритмов комплексной компенсации погрешностей позволяет снизить темп нарастания ошибки по координате с $\sigma_{\kappa} = 4000$ м до $\sigma_{\kappa} = 500$ м за час полета. При этом предельные ошибки определения скорости полета снижаются с 1,8 м/с до 0,3 м/с, углов определения вертикали – с 30" до 8", азимута – с 1,6' до 0,2', что в 3 – 4 раз меньше аналогичных ошибок обычной БИНС.

Литература

1. Пат. 2362975 Российская Федерация, МПК G01C19/56, G01P9/04. Твердотельный волновой гироскоп / Бражнев С.М., Шепеть И.П., Онуфриенко В.В., Иванов М.Н., Бондаренко Д.В., Захарин А.В., Слесаренок С.В.; заявитель и патентообладатель Бражнев С.М., Шепеть И.П., Онуфриенко В.В., Иванов М.Н., Бондаренко Д.В., Захарин А.В., Слесаренок С.В., – № 2008100657/28. заявл. 09.01.2008, опубл. 27.07.2009, Бюл. № 21. – 8 с.
2. Использование фильтра Калмана для оптимизации комплексных навигационных систем [Текст] / А.Н. Хабаров, Д.В. Бондаренко, А.В. Захарин, С.В. Ипполитов // Сборник трудов Международной научно-практической конференции. Сер. Инновационные направления развития в образовании, экономике, технике и технологиях. – 2014. – С. 183–187.
3. Пат. 2362977 Российская Федерация, МПК G01C21/10. Способ компенсации инструментальных погрешностей бесплатформенных инерциальных навигационных систем и устройство для его осуществления / Шепеть И.П., Онуфриенко В.В., Иванов М.Н., Бондаренко Д.В., Захарин А.В., Слесаренок С.В., Иванов И.М., Кучевский С.В., заявитель и патентообладатель Шепеть И.П., Онуфриенко В.В., Иванов М.Н., Бондаренко Д.В., Захарин А.В., Слесаренок С.В., – №2008121099/28(024981). заявл. 26.05.2008, опубл. 27.07.2009. – 9 с.
4. Шепеть, И.П. Дуальное управление по неполной информации в информационно-измерительных системах [Текст] / И.П. Шепеть, А.А. Варнавский // НаукаПарк. – 2013. Вып. 6 (16). – С. 113–117.

Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
Технологический институт сервиса (Филиал Донского государственного технического университета),
г. Ставрополь
Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков

THE MANAGED INERTIAL NAVIGATION MULTISYSTEM

V.P. Napolsky, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Military and air academy of a name of professor of N. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, Voronezh, Russian Federation, e-mail: napvp@mail.ru

S.V. Slesarenok, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Military and air academy of a name of professor of N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, Voronezh, Russian Federation, e-mail: sergulik@mail.ru

I.P. Shepet, Candidate of Technical Sciences, full professor, Institute of technology of service, DGTU branch, Stavropol, Russian Federation, e-mail: sergulik@mail.ru

A.V. Zakharin Candidate of Technical Sciences, senior lecturer, the Krasnodar military college of pilots, Krasnodar, Russian Federation, e-mail: Siralex13@yandex.ru

V.I. Rubinov, Candidate of Technical Sciences, professor, Military and air academy of a name of professor of N. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, Voronezh, Russian Federation, e-mail: rubinov777@mail.ru

The analysis of a condition and prospects of development of inertial sensors allows to draw a conclusion that their development is now at such stage when the existing inertial sensors do not meet requirements for cost and accuracy any more. A perspective method of increase of accuracy of any measuring systems is the method of functional multiplexing by spatial control of measuring instruments of vector sizes. For its implementation two blocks of sensitive elements which include in the structure on three one sedate gyroscope and the accelerometer are used. By means of a control unit blocks of sensitive elements are located in space so that their vectors of errors of measurement were opposite directed. This method of management of vectors of errors theoretically allows to increase the accuracy of measurement of vector parameters of a multisystem from three component measuring instruments by 2,5 – 3,5 times in comparison with regular averaging of indications of sensitive elements. The developed management program, allows to create the working signals providing movement to the minimum value of an output mistake. In this case the amount of modules of vectors of errors will be minimum and dispersion of an error of navigation measurements considerably will decrease. The algorithm of functioning of the managed inertial navigation multisystem allows to compensate not only the main errors of sensitive elements, but also errors of determination of orientation of the block of sensitive elements

Key words: inertial navigation system, block of sensitive elements, flight and navigation complex

References

1. Pat. 2362975 Rossijskaya Federaciya, MPK G01C19/56, G01P9/04. Tverdotel'nyj volnovoj giroskop [Solid-state wave gyroscope] / Brazhnev S.M., Shepet' I.P., Onufrienko V.V., Ivanov M.N., Bondarenko D.V., Zakharin A.V., Slesarenok S.V.; zayavitel' i patentoobladatel' Brazhnev S.M., SHepet' I.P., Onufrienko V.V., Ivanov M.N., Bondarenko D.V., Zakharin A.V., Slesarenok S.V., – № 2008100657/28. zayavl. 09.01.2008, opubl. 27.07.2009, Byul. № 21. – 8 s.
2. Habarov A.N., Bondarenko D.V., Zakharin A.V., Ippolitov S.V. Ispol'zovanie fil'tra Kalmana dlya optimizacii kompleksnyh navigacionnyh sistem [Use of the filter of Kallman for optimization of complex navigation systems] // Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Ser. Innovacionnye napravleniya razvitiya v obrazovanii, ehkonomie, tekhnike i tekhnologiyah. – 2014. – S. 183–187.
3. Pat. 2362977 Rossijskaya Federaciya, MPK G01C21/10. Sposob kompensacii instrumental'nyh pogreshnostej besplatformennyh inercial'nyh navigacionnyh sistem i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya [A method of compensation of tool errors the besplatformennykh of inertial navigation systems and the device for its implementation] / Shepet' I.P., Onufrienko V.V., Ivanov M.N., Bondarenko D.V., Zakharin A.V., Slesarenok S.V., Ivanov I.M., Kuchevskij S.V., zayavitel' i patentoobladatel' SHepet' I.P., Onufrienko V.V., Ivanov M.N., Bondarenko D.V., Zakharin A.V., Slesarenok S.V., – №2008121099/28(024981). zayavl. 26.05.2008, opubl. 27.07.2009. – 9 s.
4. Shepet' I.P., Varnavskij A.A. Dual'noe upravlenie po nepolnoj informacii v informacionno-izmeritel'nyh sistemah [Dual management according to incomplete information in information and measuring systems of] // NaukaPark. – 2013. Vyp. 6 (16). – S. 113–117.

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В SIMULINK СИСТЕМЫ ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТА С МНОГОСЛОЙНЫМ ПЕРСЕПТРОНОМ

Ю.И. Ерёмченко, М.Г. Данилова, К.О. Рукавицын

Рассматривается модифицированный метод прямого управления моментом (ПУМ), основанный на концепции искусственной нейронной сети (ИНС), при котором может быть достигнут быстрый отклик при низких флуктуациях момента асинхронного двигателя. Таблица переключений Такахаши классического прямого управления моментом заменена многослойным перцептроном. Входами искусственной нейронной сети являются ошибка по моменту, ошибка по потокосцеплению и положение вектора потокосцепления статора, а выход – пространственный вектор напряжения. Для обучения нейронной сети был использован алгоритм обратного распространения ошибки Левенберга - Марквардта. Для сравнения характеристик привода с классической структурой регулирования и рассмотренной структурой на нейронной сети выполнено численное моделирование в Matlab/Simulink. Результаты моделирования наглядно демонстрируют уменьшение пульсаций момента при использовании структуры регулирования на нейронной сети

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, прямое управление моментом, таблица переключений

Введение

Изменения классической таблицы переключений в системах с прямым управлением момента выполняются для улучшения пускового режима и режима перегрузки, работы в диапазоне очень низких частот, уменьшения флуктуаций момента и ослабления уровня помех. Применение нейросетей имеет ряд преимуществ над другими схемами прямого управления моментом для асинхронных двигателей: уменьшение сложности системы регулирования; уменьшение эффектов от изменения параметров двигателя, особенно при вычислении потокосцепления статора; уменьшение времени отклика, т.к. нейросети выполняют параллельную обработку суммирования, умножения на постоянные коэффициенты усиления и широко известные нелинейные функции; улучшают робастность привода – нейросети отказоустойчивы и могут извлекать информацию из зашумленных сигналов.

Основным недостатком системы прямого управления моментом (DTC) являются пульсации тока и электромагнитного момента. Одной из причин флуктуаций момента в приводах с DTC является ограниченное количество векторов напряжений (2 нулевых и 6 базовых) [1]. Такие пульсации генерируют высшие гармоники, приводящие к возникновению вибраций и шумов, отрицательно влияющие на надежность работы привода и сокращающие срок его службы. В настоящее время предлагаются многочисленные технические решения, связанные как с усложнением конструкции инверторов, так и с совершенствованием алгоритмов управления, позволяющие минимизировать флуктуации электромагнитного момента.

Ерёмченко Юрий Иванович – СТИ НИТУ «МИСиС», д-р техн. наук, профессор, e-mail: erem49@mail.ru
Данилова Майя Геннадьевна – СТИ НИТУ «МИСиС», канд. техн. наук, доцент, e-mail: priwod.ap@yandex.ru
Рукавицын Кирилл Олегович – СТИ НИТУ «МИСиС», студент, e-mail: kirill_rukavitsyn@mail.ru

Постановка задачи

Для уменьшения пульсаций момента и тока в переходных и установившихся режимах, исключения снижения потокосцепления, вызванного изменениями секторов и улучшения динамической характеристики скорости в системе регулирования с ПУМ, классическая таблица переключений Такахаши заменена на искусственную нейронную сеть. Входами искусственной нейронной сети являются ошибка по моменту (T_m), ошибка по потокосцеплению статора (T_ψ), номер фазового сектора (N), выходами являются состояния 6 ключей инвертора (S1-S6).

В настоящей статье предложена структура ИНС, позволяющей заменить классическую таблицу переключений Такахаши, а также выполнено сравнение результатов моделирования классической системы DTC и DTC с нейронной сетью.

В приложении Simulink среды MATLAB модель системы прямого управления моментом (рис. 1) состоит из блоков, реализующих: логику системы управления 1; асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (Induction machine) 2; регулятор скорости (Speed Controller) 3; трехфазный диодный выпрямитель (Three-phase diode rectifier) 4; тормозной прерыватель (Braking chopper) 5; трехфазный инвертор напряжения, реализованный на IGBT-транзисторах (Three-phase inverter) 6.

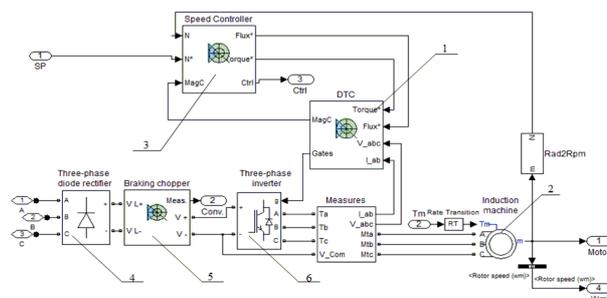


Рис. 1. Модель системы ПУМ

Многослойный перцептрон, заменяющий таблицу переключений Такахаши

Предлагаемая нейронная сеть прямого распространения имеет следующую структуру (рис. 2):

3 входных и 6 выходных нейронов с линейной функцией активации (purelin); 30 нейронов скрытого слоя с функцией активации – гиперболический тангенс (tansig). Обучение нейронной сети выполнено методом обратного распространения ошибки Левенберга - Марквадта. Данная ИНС принадлежит к классу многослойных персептронов.

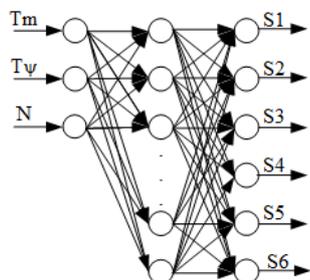


Рис. 2. Структура предлагаемой ИНС

Для обучающей выборки была использована классическая таблица переключений. Так как она является конечной, т.е. для всех возможных комбинаций входных значений ошибок по моменту, потокоцеплению и секторам существует соответствующий пространственный вектор напряжения, то такая нейронная сеть будет решать проблему ассоциативной памяти, а значит содержимое памяти может быть вызвано по искаженному входному сигналу.

Результат обучения нейронной сети показал, что при небольшом количестве эпох, конечная ошибка обучения равна $3,95 \cdot 10^{-27}$ и достигается после 13 итераций (рис. 3). Соотношение «конечная ошибка обучения / количество эпох» говорит об оптимально подобранной структуре многослойного персептрона.

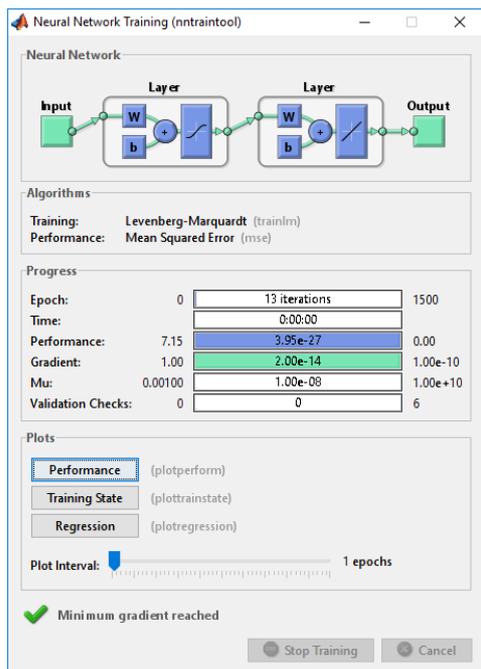


Рис. 3. Окно обучения ИНС

Синтезированная подсистема Switching table (Таблица переключений) [2 – 3], представлена на рисунке 4.

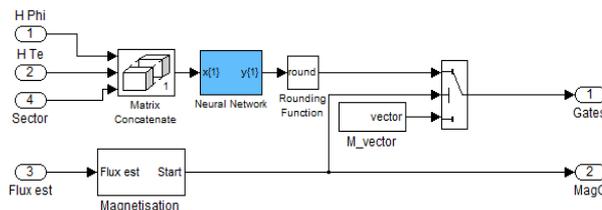


Рис. 4. Подсистема Switching table (Таблица переключений) с ИНС

Результаты моделирования

Исследования проводились на модели электродвигателя фирмы ABB типа M2CA 315 SA выходной номинальной мощностью 110 кВт, с номинальной скоростью 1487 об/мин. Были рассмотрены классическая система DTC и DTC с искусственной нейронной сетью.

В процессе моделирования исследовался рабочий цикл, включающий в себя: разгон двигателя до скорости 1487 об/мин, скачкообразное приложение момента нагрузки 660 Н·м в момент времени 1,1 с, сброс нагрузки в 1,4 с, торможение привода до останова (рис. 5 – 10).

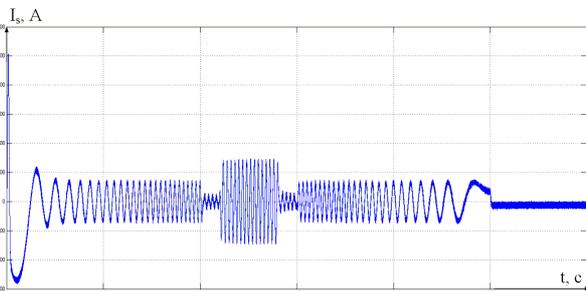


Рис. 5. Временная зависимость тока статора классической системы прямого управления моментом

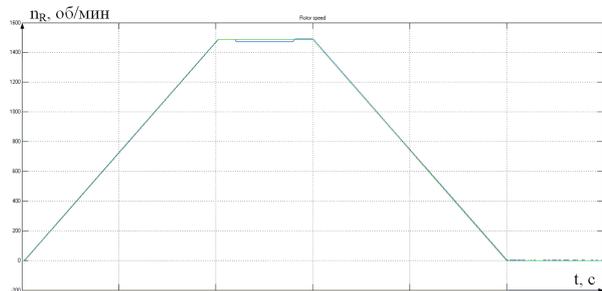


Рис. 6. Временная зависимость скорости вращения ротора классической системы прямого управления моментом

При моделировании в классической системе DTC размах колебаний момента $\Delta M = M_{max} - M_{min}$ равен 100 Н·м (рис. 7), в нейросетевой системе – 60 Н·м (рис. 10).

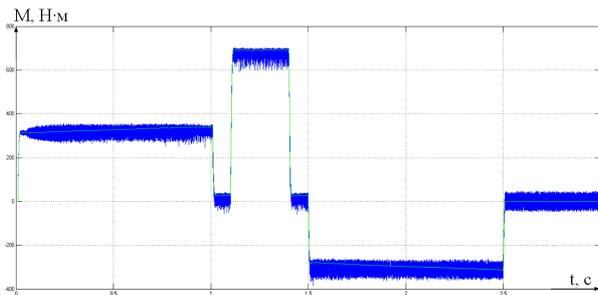


Рис. 7. Временная зависимость электромагнитного момента двигателя классической системы прямого управления моментом

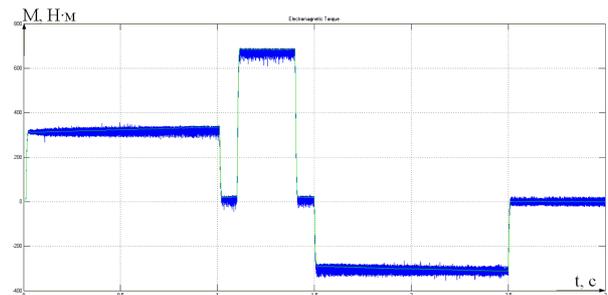


Рис. 10. Временная зависимость электромагнитного момента двигателя системы прямого управления моментом с ИНС

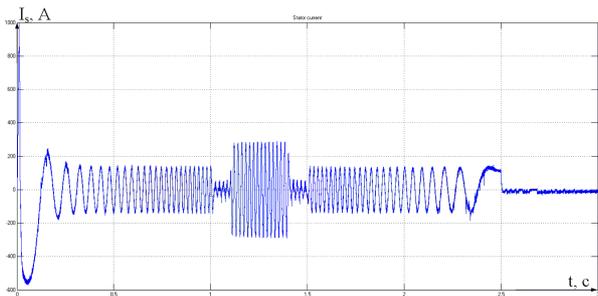


Рис. 8. Временная зависимость тока статора системы прямого управления моментом с ИНС

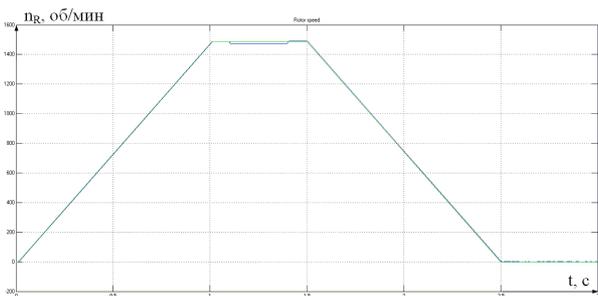


Рис. 9. Временная зависимость скорости вращения ротора системы прямого управления моментом с ИНС

Заключение

Предлагаемый многослойный перцептрон обучен за малое количество итераций, при ошибке обучения, стремящейся к нулю, что говорит об оптимально подобранной структуре ИНС. Использование искусственной нейронной сети способно повысить робастность привода, за счет обработки зашумленных входных сигналов. Моделирование показало, что использование ИНС снизило пульсации момента на 40%, улучшив статические и динамические характеристики привода.

Литература

1. Усольцев, А.А. Современный асинхронный электропривод оптико-механических комплексов [Текст]: учеб. пособие / А.А. Усольцев -. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 164 с.
2. Direct Torque Control of Induction Machine based on Intelligent Techniques/ S. Gdaim, A. Mtibaa, M.F. Mimouni// International Journal of Computer Applications, 2010. – №8 [Электронный документ] // URL: <http://www.ijcaonline.org/volume10/number8/pxc3872017.pdf> (дата обращения 01.02.16)
3. Minimization Of Current, Flux & Torque Ripples Content Of DTC Of Induction Motor Drive At Very Low-Speeds/ K.Triveni Naidu, Ms.P. Durga Bhavani,Mr.G. Tirupati Naidu// International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development, 2015. – №5 [Электронный документ] // URL: <http://rspublication.com/ijeted/2015/jan15/4.pdf> (дата обращения 01.02.16)

Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

DIGITAL SIMULATION OF DIRECT TORQUE CONTROL SYSTEM BASED ON MULTI-LAYER PERCEPTRON NEURAL NETWORK IN SIMULINK

Yu.I. Eremenko, Doctor of Technical Science, Full Professor, Sary Oskol Technological Institute n.a. A.A. Ugarov (branch), National University of Science and Technology «MISiS», Sary Oskol, Russian Federation, e-mail: erem49@mail.ru

M.G. Danilova, Candidate of Technical Science, associate professor, Sary Oskol Technological Institute n.a. A.A. Ugarov (branch), National University of Science and Technology «MISiS», Sary Oskol, Russian Federation, e-mail: priwod.ap@yandex.ru

K.O. Rukavitsyn, Student, Stary Oskol Technological Institute n.a. A.A. Ugarov (branch), National University of Science and Technology «MISiS», Stary Oskol, Russian Federation, e-mail: kirill_rukavitsyn@mail.ru

Modified direct torque control (DTC) method, proposed in the paper, is based on artificial neural network (ANN) concept, where fast torque response with low ripple in the torque of induction motor can be achieved. The Takahashi switching table of the conventional DTC is replaced by the multi-layer perceptron neural network. Artificial neural network having inputs the torque error, the stator flux error and position of stator flux, and as output the voltage space vector. Levenberg-Marquardt back propagation technique has been used to train the neural network. Matlab/Simulink based numerical simulations have been carried out to compare drive performances with conventional control structure and proposed neural network based structure. The simulation results clearly depict, that the torque ripple has been reduced, when artificial neural network based control structure has been used

Key words: Artificial Neural Network (ANN); direct torque control (DTC); switching table

References

1. Usol'cev A.A. Sovremennyy jelektroprivod optiko-mehanicheskikh kompleksov [Modern asynchronous electric opto-mechanical systems]/ Uchebnoe posobie. Spb: SPbGU ITMO, 2011. – 164 p.
2. Direct Torque Control of Induction Machine based on Intelligent Techniques/ S. Gdaim, A. Mtibaa, M.F. Mimouni// International Journal of Computer Applications, 2010. – №8 [Electronic document] // URL: <http://www.ijcaonline.org/volume10/number8/pxc3872017.pdf> (date of application 01.02.16)
3. Minimization Of Current, Flux & Torque Ripples Content Of DTC Of Induction Motor Drive At Very Low-Speeds/ K.Triveni Naidu, Ms.P. Durga Bhavani,Mr.G. Tirupati Naidu// International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development, 2015. – №5 [Electronic document] // URL: <http://rpublication.com/ijeted/2015/jan15/4.pdf> (date of application 01.02.16)

МНОГОАЛЬТЕРНАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ СОПРЯЖЕННЫХ СИСТЕМ

С.Л. Подвальный

Рассмотрены общие закономерности оптимизации и управления экспериментом при использовании точных оценок градиента с помощью моделей сопряженных систем. Предложены типовые схемы реализации для наиболее распространенных постановок задач проведения экспериментом, включая измерения по косвенным оценкам, наблюдаемость всей временной траектории либо только ее терминального (конечного) состояния, наличие в распоряжении исследователя модели статического либо динамического типа. Полученная система модулей составляет основу математического и программного обеспечения в рамках автоматизированных систем научных исследований с использованием концепции многоальтернативности. В перспективе возможно включение в систему модулей для пространственно-временной оптимизации на основе рассмотренных работ по моделям с распределенными параметрами на графе

Ключевые слова: управление экспериментом, сопряженная система, типовые модули, многоальтернативность

Введение

С самого начала своего возникновения теория оптимизации и управления экспериментом использовала для этих целей методы моделирования; может быть даже правильным будет утверждать, что они развивались одновременно, взаимно дополняя друг друга.

Одно время очень популярными были статистические методы планирования эксперимента (активные и пассивные), когда в процессе целенаправленного изменения условий удавалось получить соответствующие модели т.н. локального характера : достоверность моделей ограничивалась областью проведения опытов и не позволяла точно прогнозировать результаты вне этой области, что являлось типичной ошибкой многих исследований!).

Другим направлением моделирования является построение детерминированных моделей, построенных на основании физико-химических закономерностей рассматриваемых явлений с более широким диапазоном достоверности и, соответственно, лучшими свойствами прогнозирования. К сожалению, мы не всегда располагаем полными данными и приходится использовать результаты экспериментов для верификации и идентификации моделей [1].

Будем далее рассматривать детерминированные модели, поскольку с позиций управления экспериментом существуют определенные резервы оптимизации, особенно если использовать для этих целей модели сопряженных систем [2-9].

Рассматриваемые задачи управления экспериментом по различным критериям [1] являются частными случаями более общей задачи оптимизации по произвольному интегральному критерию [2,3]:

$$J = \int_0^T \Phi(\bar{X}(t), \bar{U}(t)) dt \quad (1)$$

Заранее оговорим, что под критерием мы будем понимать математическую формулировку целей управления экспериментом, что особенно важно при проектировании и реализации т.н. АСНИ- автоматизированных систем научных исследований, математическое обеспечение которых использует как математические модели. так и соответствующие численные алгоритмы их программной реализации на ЭВМ в рамках упомянутых систем обработки информации в режиме реального времени и соответственно управления

Выбор такого интегрального критерия (1) вызван необходимостью управлять экспериментом на всем временном интервале его проведения-как с фиксированным, так и свободным концом. Другая особенность критерия - используемая под-интегральная функция должна учитывать все пространство состояний $x(t)$, описываемое моделью, и по своему математическому смыслу это должна быть некоторая свертка в пространстве состояний; наиболее важные свойства таких сверток рассмотрены в [4,10] применительно к многоальтернативным системам управления и принятия решений .

Решение таких задач динамической оптимизации осуществляется поисковыми методами (например, из числа рассмотренных в [4]), отличительной особенностью которых является необходимость точного вычисления градиента критерия по управляющим переменным \bar{U} .

При этом одновременно должны выполняться некоторые равенства, относящиеся к модели объекта и представленные дифференциальными, алгебраическими либо смешанными уравнениями:

$$\frac{d\bar{X}}{dt} = \bar{f}(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{U}); \bar{\varphi}(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{U}) = 0; \bar{X}(0) = \bar{X}_0 \} \quad (2a,b)$$

Рассмотрим далее наиболее распространенные задачи оптимального управления экспериментом , отличающиеся альтернативными вариантами моделей и критериев , а также способам измерения основных переменных.

Общая постановка

«Идеальная» система управления экспериментом предполагает что мы реализуем средствами вычислительной техники некий синтезированный заранее профиль (траекторию) изменения пространства состояний и вводим оперативную коррекцию по реальным измерениям в ходе эксперимента в рамках АСНИ. Конечно, это далеко не всегда возможно и целесообразно рассмотреть более реалистичные варианты управления экспериментом с учетом достоверных моделей и связанных с этим критериев.

Хотелось бы обратить внимание также на то, что управление принципиально при этом не всегда необходимо сохранять постоянным на всем временном интервале экспериментирования- важен оптимальный результат (экстремум критерия), хотя не всегда традиционные схемы экспериментирования используют такие вариации. Здесь скорее действует фактор привычки и связанный с ним человеческий фактор!

Ранее в работе [11] проблема точного определения градиента с использованием сопряженных систем была рассмотрена в самом общем виде, как задача нахождения дифференциала сложной функции Z .

Доказано, что:

«ЕСЛИ: [$E; F$ – нормированные (т.е. банаховы) пространства, и дифференцируемый функционал имеет вид:

$$Z = J(\bar{X}, \bar{U}) \quad (3)$$

и определен при $\bar{X} \in E; \bar{U} \in F$ на топологическом произведении $E \times F$;] И ЕСЛИ: [одновременно переменные связаны соотношениями:

$$\bar{f}(\bar{X}, \bar{U}) = \bar{C} \quad (4)$$

где $\bar{f}(\bar{X}, \bar{U})$ - дифференцируемое отображение $E \times F$ в E .]»

ТО (при определенных свойствах этих функций: дифференцируемость, обратимость линейного преобразования и отображения),-

[«-дифференциал функционала (3) в некоторой фиксированной точке ($\bar{U}_0 \in F, \bar{X}_0 = \bar{g}(\bar{U}_0) \in E$) можно определить из выражения :

$$dZ = [J'_{\bar{U}}(\bar{X}_0, \bar{U}_0) - \bar{\Psi}' f'_{\bar{X}}(\bar{X}_0, \bar{U}_0)] d\bar{U} \quad (5)$$

которое рассматривается как основное для получения градиента сложной функции с помощью сопряженной системы $\bar{\Psi}$,»]

Пользуясь свойством сопряженного оператора ($A^* J = JA$), получим:

$$\begin{aligned} \bar{\Psi} &= J'_{\bar{X}}(\bar{X}_0, \bar{U}_0) \left[f'_{\bar{X}}(\bar{X}_0, \bar{U}_0) \right]^{-1} = \\ &= \left[f'_{\bar{X}}(\bar{X}_0, \bar{U}_0)^{-1} \right]^* J'_{\bar{X}}(\bar{X}_0, \bar{U}_0) \end{aligned} \quad (6)$$

Часто $\bar{\Psi}$ задают в неявном виде при совместном решении с (5):

$$\left[f'_{\bar{X}}(\bar{X}_0, \bar{U}_0) \right]^* \bar{\Psi} = J'_{\bar{X}}(\bar{X}_0, \bar{U}_0) \quad (7)$$

Его принято называть сопряженным процессом (по терминологии [5] при оптимизации сложных химико-технологических схем).

Мы еще будем обращаться к этой общей схеме при получении частных решений.

Рассмотрим конкретные реализации для различных типовых постановок задачи многоальтернативного управления экспериментом с использованием системы модулей [1,9].

Конечно, специфика каждого исследования не всегда может быть "втиснута" в типовые постановки таких гипотетических теоретических схем, но рассмотрение ниже рассмотренных вариантов дает представление об общих проблемах в этой области.

Исходим из предположения, что в каждой конкретной ситуации анализ нескольких близких по своей постановке типовых модулей, поможет выбрать конкретную схему проведения эксперимента в рамках интеллектуальной системы принятия решений, как это трактуется в работах [15-18].

Особенно, если в дальнейшем у нас будет возможность в процессе эксплуатации ввести в общий состав реальной проектируемой АСНИ такой наиболее эффективный вариант ,как подсистему БЗ- т.е. базу знаний ,адаптивно настраиваемую на конкретный тип и специфику того класса экспериментов, с которым мы конкретно имеем дело.

Типовые постановки и соответственно модули будут отличаться моделями, критериями и способам измерения и наблюдения.

Из рекомендуемого общего числа 8-10 модулей рассмотрим только четыре- этого вполне достаточно для понимания тех общих проблем теоретического характера, которые обычно возникают.

Модуль 1. Пусть мы располагаем только моделями для установившихся процессов-модели статики, как принято говорить.

Ясно, что ни о каких-либо траекториях не идет речь, можно только рассуждать о следующих простых постановках задач:

-найти чувствительность модели к различным управлениям для выбора наиболее целесообразного по эффективности;

-провести редукцию пространства состояний модели (и связанных с ним измерений) по оценкам градиента.

С точностью до более простых обозначений система уравнений имеет вид как записано ниже ($J=z$).

а. основная система «модель и критерий» представляет собой систему нелинейных алгебраических уравнений для модели с одним (или поочередно несколькими) критериями J:

$$J = F(\bar{x}, \bar{u}) \quad (8)$$

$$\bar{f}(\bar{x}, \bar{u}) = 0 \Rightarrow \quad (9)$$

б. модель сопряженного процесса-система уравнений:

$$\left\| \frac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{x}} \right\| * \bar{\Psi} = - \frac{\partial F}{\partial \bar{x}} \quad (10)$$

Обратим внимание, что это линейная система уравнений, хотя исходная постановка была нелинейной!

в. Градиент и вариация функционала тоже находятся из взаимосвязанной с сопряженной моделью системы линейных уравнений:

$$\nabla J = \frac{\partial F}{\partial \bar{u}} + \left\| \frac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{u}} \right\| * \bar{\Psi} \quad (11)$$

$$dJ = (\nabla J, d\bar{u}) \quad (12)$$

Если размерность пространства состояний [n], и размерность управлений [m], то придется в итоге решать систему совместных линейных уравнений размерности [n+m]. В принципе такие задачи достаточно легко решаются стандартными программами и пакетами прикладных программ.

Модуль 2. Известна модель динамики (кинетики, нестационарного процесса - по терминологии разных авторов), - которая задана в форме системы обыкновенных дифференциальных уравнений, но нас интересует и мы хотим управлять только конечным состоянием. Причины выбора такого критерия могут быть самые разные, но такое требование "конечного результата" довольно часто имеет место.

С учетом принятых упрощенных обозначений:

А. основная система «модель-критерий» характеризуется свойствами: модель-это система обыкновенных дифференциальных уравнений, заданных в форме Коши; -критерий задан в форме нелинейного алгебраического уравнения по вектору состояний эксперимента в конечный момент времени $t=T$:

$$\left. \begin{aligned} J &= F[\bar{x}(T)] \\ \frac{d\bar{x}}{dt} &= \bar{f}[\bar{x}(t), \bar{u}(t)] \\ \bar{x}(0) &= \bar{x}_0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Б. модель сопряженного процесса:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{\Psi}}{dt} + \left\| \frac{\partial \bar{f}(t)}{\partial \bar{x}} \right\| * \bar{\Psi} &= 0 \\ \bar{\Psi}(T) &= F'_{\bar{x}}[\bar{x}(T)] \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

В. Градиент и вариация функционала:

$$\frac{\partial J[\bar{u}(\cdot)]}{\partial \bar{u}(t)} = \left\| \frac{\partial \bar{f}[t]}{\partial \bar{u}} \right\| * \bar{\Psi}(t) \quad (15)$$

$$\delta J[\delta \bar{u}(\cdot)] = \int_0^T \left(\frac{\partial J(\bar{u}(\cdot))}{\partial \bar{u}(t)} \right), \delta \bar{u}(t) dt \quad (16)$$

Как и ранее, получили системы линейных уравнений (но теперь уже линейных дифференциальных уравнений), которые решаются

отдельно для сопряженной модели и градиента в силу специфики задания начальных и граничных условий. При небольшой размерности уравнения могут быть решены аналитически, при большой размерности используются соответствующие численные методы (Рунге-Кутта, Адамса и др.)

Обратим внимание на тот факт, что нам становятся известными оценки градиента в каждой точке траектории эксперимента по отношению к конечному состоянию системы, что позволяет изменять тактику управления в процессе эксперимента (если речь идет о длительных по времени работах и возможности выбирать если не полностью переменное, то хотя бы кусочно-постоянное управление на каждом отдельном временном интервале), используя т.н. интервальное управление [2].

Обратимся снова к [11] - для функционала вида:

$$Z = \int_0^T \Phi[\bar{X}(t), \bar{U}(t)] dt \quad (17)$$

И модели:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{X}}{dt} &= f(\bar{X}, \bar{U}); \bar{X}(0) = \bar{X}_{00} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

обозначив в точке $(\bar{X}_0(t), \bar{U}_0(t))$ матрицы А и В:

$$A = \left\| \bar{f}'_{\bar{X}} \right\|; B = \left\| \bar{f}'_{\bar{U}} \right\| \quad (19)$$

Получено [11]

$$dZ = \int_0^T \sum_{k=1}^m \left(\frac{\partial \Phi}{\partial U^k} - \sum_{i=1}^n \Psi_i \frac{\partial f_i}{\partial U^k} \right) \delta U^k(t) dt \quad (20)$$

где $\bar{\Psi}(t)$ решение системы дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\bar{\Psi}(t)}{dt} = A * \bar{\Psi}(t) = \Phi'_{\bar{X}}[\bar{X}_0(t), \bar{U}_0(t)] \bar{\Psi}(t) \quad (21)$$

Отметим, что сопряженная система является линейной (хотя исходная система критерий-ограничения может быть нелинейной) и решается она в «обратном времени» при нулевых граничных условиях (при $t=T$)

Таким образом, получим совпадающее с [2,6] в принятых обозначениях:

$$\frac{dZ}{dU} = \frac{d\Phi}{dU} - \bar{\Psi} B \quad (22)$$

Модуль 3. Проведем дальнейшее упрощение задачи, сделав предположение, что несмотря на то, что динамическая модель известна, мы бы хотели упростить процесс реализации, выбрав некоторое среднее –оптимальное в данных условиях управление и сохраняя его постоянным на всем временном интервале от 0 до T. Разумеется, мы можем сравнить результат с предыдущим в рамках системы многоальтернативного управления экспериментом и оценить потери по величине изменения критерия. Следует понимать, что возникшая разница - это «плата» за удобство и

простоту эксперимента, в данном случае постоянство управления.

Как и ранее, имеем:

А. исходная система модель-критерий:

$$J = \int_0^T \Phi[\bar{x}(t), \bar{p}] dt + F[\bar{x}(T)] \quad (23)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{x}}{dt} &= \bar{f}[\bar{x}(t), \bar{p}] \\ \bar{x}(0) &= \bar{x}_0 \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Здесь такое усредненное, постоянное на всем временном интервале управление обозначено как вектор $\bar{U} = \bar{P}$

Б. модель сопряженного процесса:

$$\frac{d\bar{\Psi}}{dt} + \left\| \frac{\partial \bar{f}(t)}{\partial \bar{x}} \right\| * \bar{\Psi} = - \frac{\partial \Phi(t)}{\partial \bar{x}} \quad (25)$$

$$\bar{\Psi}(T) = F'_x[\bar{x}(T)]$$

В. Градиент и вариация функционала:

$$\nabla J = \int_0^T \left[\frac{\partial \Phi}{\partial \bar{p}} + \left\| \frac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{p}} \right\| * \bar{\Psi}(t) \right] dt \quad (26)$$

$$dJ(d\bar{p}) = (\nabla J, d\bar{p})$$

Как и ранее, все замечания относительно нелинейности исходной и линейности полученных систем сохраняются.

Все полученные оценки – это чувствительность критерия к соответствующим коэффициентам модели (различать: те , которые можно изменять с целью управления, и те , которые можно использовать для упрощения модели-редукции пространства состояний эксперимента за счет пренебрежения второстепенными эффектами) при разработке модели.

Тогда для чисто интегрального критерия [11] можно записать:

$$\nabla Z = \left\| \frac{dZ}{du^1}, \dots, \frac{dZ}{du^m} \right\|^T = \int_0^T \left(\frac{\partial F}{\partial \bar{U}} - (\Psi, \frac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{U}}) \right) dt \quad (27)$$

что совпадает с принятыми соотношениями теории чувствительности.

Модуль 4. Пусть речь идет об еще более реалистичной типовой ситуации, когда пространство $x(t)$ состояний модели невозможно наблюдать, но имеется некоторое связанное с ним пространство $y(t)$ реальных измерений хода и конечного состояния эксперимента. Вот в этом пространстве измерений и приходится решать все вышеуказанные и другие задачи управления экспериментом.

Как правило, при этом приходится предварительно решать т.н. задачу наблюдаемости, т.е. оценить принципиальную возможность восстановления по сделанным измерениям $y(t)$ необходимые для анализа состояния эксперимента $x(t)$ / Заметим, что такая задача решена в настоящее время только для линейно связанных пространств состояний и измерений [1,5,12] а значит, требуется

построить линейное приближение по тем же оценкам градиента через сопряженные системы.

Общая формулировка такой типовой модели представлена ниже.

А. основная система «критерий-модель состояния-модель измерения»

$$J = \int_0^T \Phi[\bar{Y}(t), \bar{\alpha}_0] dt \quad (28)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{x}}{dt} &= \bar{f}[\bar{x}(t), \bar{p}] \\ \bar{x}(0) &= \bar{x}_0 \\ \bar{Y}(t) &= \bar{g}[\bar{x}(t), \bar{q}] \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

Б. сопряженная система:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{\Psi}}{dt} + \left\| \bar{f}'_{\bar{x}}(t) \right\| * \bar{\Psi} &= \\ = - \left\| \bar{g}'_{\bar{x}} \right\| * \Phi'_{\bar{y}} & \\ \bar{\Psi}(T) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

В. Градиент и вариация функционала

$$\nabla J = \left\| \begin{aligned} \int_0^T \Phi'_{\bar{\alpha}_0}[t] dt \\ \int_0^T \left\| \bar{f}'_{\bar{p}} \right\| * \bar{\Psi}(t) dt \\ \int_0^T \left\| \bar{g}'_{\bar{q}} \right\| * \Phi'_{\bar{y}}(t) dt \end{aligned} \right\| \quad (31)$$

$$dJ = (\nabla J, d\bar{Q}); \quad (32)$$

$$\bar{Q} = \left\| \bar{\alpha}_0, \bar{p}, \bar{q} \right\|^T$$

Эти результаты могут быть сведены в систему типовых модулей и позволяют выбрать любой из представленных выше модулей в зависимости от условий реализации и управления экспериментом в рамках создаваемой АСНИ. Ряд подобных модулей положены в основу систем оптимизации статических и динамических режимов процессов синтеза полимеров конкретных объектов [6,7] и сложных систем в целом [8-9]. Общее число таких модулей обычно – не более 10.

По-видимому, в зависимости от частных особенностей и функций проектируемой системы управления экспериментом либо просто моделирования в нее войдут все рассмотренные модули, либо их часть. Обычно, для облегчения выбора модулей строится соответствующий логический граф [1,9] либо используют эволюционный подход [15-17].

Что касается самих поисковых алгоритмов оптимизации, то они используют полученные значения градиента для оптимизации в пространстве управлений, число которых при этом значительно больше числа координат \bar{X} или \bar{Y} (например, в задаче с кусочно-постоянными интервалами [2]

изменения управления). Наличие точных оценок градиента позволяет использовать наиболее эффективные квази-ньютоновские методы (например, Давидона-Флетчера-Пауэлла [5] либо проекции градиента [2]) известным путем.

Другие особенности самой процедуры оптимизации будут предметом отдельного рассмотрения.

Заключение. Использование типовых модулей определения градиента с использованием сопряженных систем позволяет легко получить необходимый вариант из числа рассмотренных и использовать наиболее эффективные методы оптимизации динамических систем вообще и их частных случаев для управления экспериментом, в частности.

В дополнение к рассмотренным выше, укажем на работы по оптимизации систем, которые описываются уравнениями в частных производных [13-21] с использованием моделей сопряженных состояний. Это позволяет оптимально управлять пространственно-распределенными экспериментами, что существенно расширит потенциальную область применения подобных систем. Планируется также выделить более простые типовые, наиболее близкие к реализации модули, и ввести их в состав общей АСНИ для управления экспериментом.

В качестве другого направления исследований с использованием рассмотренных вариантов определения градиента упомянем обширный класс решения обратных задач (идентификации) моделей динамических систем [6,8,11,16] с использованием интеллектуальных методов многоальтернативного моделирования [14-17] и управления [9,18] сложными объектами.

Литература

1. Подвальный, С.Л. Моделирование промышленных процессов полимеризации [Текст] / С.Л. Подвальный. - М.: Химия. - 1979.
2. Федоренко, Р.П. Введение в вычислительную физику [Текст] / Р.П. Федоренко. - М.: МФТИ. - 1994.
3. Янг, Л. Лекции по вариационному исчислению и теории оптимального управления [Текст] / Л. Янг. - М.: Мир. - 1974.
4. Подвальный, С.Л. Информационно-управляющие системы мониторинга сложных объектов [Текст] / С.Л. Подвальный. - Воронеж. - 2010.
5. Островский, Г.М. Оптимизация в химической технологии [Текст] / Г.М. Островский, Ю.М. Волин, Н.Н. Зиятдинов // - Казань. - 2005.
6. Подвальный, С.Л. Сопряженные системы и градиент при оптимизации динамических систем [Текст] /С.Л. Подвальный// Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2012. - Т.8. №12-1. - с. 57-62.
7. Подвальный, С.Л. Решение задач градиентной оптимизации каскадно-реакторных схем с использованием сопряженных систем [Текст] /С.Л. Подвальный// Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т.9. - №2. - с. 27-32.
8. Подвальный, С.Л. Многоальтернативные системы: обзор и классификация [Текст] /С.Л.

Подвальный// Системы управления и информационные технологии. - 2012. - Т.48. - №2. - с. 4-13.

9. Подвальный, С.Л. Многоальтернативное управление открытыми системами: концепция, состояние и перспективы [Текст] / С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев// Управление большими системами: сборник трудов. - 2014. - №48. - с. 6-58.

10. Леденева, Т.М. Моделирование оценочных систем на основе принципа много-альтернативности [Текст] /Т.М. Леденева, С.Л. Подвальный// Системы управления и информационные технологии. - 2014. - Т. 57. - №3.1. - с.155-161.

11. Подвальный, С.Л. Особенности поисковой градиентной оптимизации сложных объектов с использованием сопряженных систем[Текст] /С.Л. Подвальный// Системы управления и информационные технологии. - 2014. - т.56. - №2. - С.18-22.

12. Подвальный, С.Л. Модульная структура системы многоальтернативного моделирования процессов полимеризации [Текст] / С.Л. Подвальный, А.В. Барабанов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т.9. - №5-1. - С.41-43.

13. Подвальный, С.Л. Оптимизация по стартовым условиям параболической системы с распределенными параметрами на графе [Текст] /С.Л. Подвальный, В.В. Провоторов// Системы управления и информационные технологии. - 2014. - Т.58. - №4. - С.70-74.

14. Подвальный, С.Л. Модели многоальтернативного управления и принятия решений в сложных системах. [Текст] /С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев// Системы управления и информационные технологии. - 2014. - Т.56. - №2.1. - С.169-173.

15. Леденева, Т.М. Системы искусственного интеллекта и принятия решений / Т.М. Леденева, С.Л. Подвальный, В.И. Васильев // - Уфа: изд. УГАТУ. - 2005. - 206 с.

16. Подвальный, С.Л. Эволюционные принципы построения интеллектуальных систем многоальтернативного управления [Текст] /С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев// Системы управления и информационные технологии. - 2014. - Т.57. - №3. - С. 4-8.

17. Махортов, С.Д. Алгебраический подход к исследованию и оптимизации баз знаний производственного типа [Текст] / С.Д. Махортов, С.Л. Подвальный // Информационные технологии. - 2008. - №8. - С.55-60.

18. Подвальный, С.Л. Многоальтернативность как основа как основа обеспечения интеллектуальности систем управления [Текст] / С.Л. Подвальный, Т.М. Леденева// Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2012. - Т.8. -№ 11. - С.17-23.

19. Подвальный, С.Л. Определение стартовой функции в задаче наблюдения параболической системой с распределенными параметрами на графе [Текст] // С.Л. Подвальный, В.В. Провоторов// Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т.10. - №6. - С.29-35.

20. Подвальный, С.Л. Управляемость дифференциальной системы параболического типа с распределенными параметрами на графе /С.Л. Подвальный, В.В. Провоторов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2015. - Т.11. - №3. - С.49-56.

21. Подвальный, С.Л. Задача оптимизации дифференциальных систем с использованием сопряженных состояний /С.Л. Подвальный, В.В. Провоторов// Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2016. - Т.12. - №2. - С.26-34.

MULTIALTERNATIVE CONTROL OF THE EXPERIMENT USING THE MODELS OF CONJUGATED SYSTEMS

S.L. Podvalny, Doctor of technical sciences, Full professor, Head of department, Voronezh state technical university, Voronezh, Russian Federation, e-mail: spodvalny@yandex.ru

In this article we examined general patterns of the control experiment when using accurate estimates of the gradient using models of conjugated systems. The proposed model scheme implementations for the most common formulation of the experiment, including measurements, indirect estimates, observability over the entire time trajectory or its end (terminal) state, the presence of the researcher models of static or dynamic type. The obtained systems of modules forms the basis of mathematical software in the framework generated by the automated systems of scientific research using the concept of multi-alternativeness. In future, possible inclusion in the system of modules for space-time optimization based on the models with distributed parameters on the graph

Key words: control of the experiment, conjugated systems, model modules, multi-alternativeness

References

1. Podvalny S.L. Modelirovanie promyshlennykh protsessov polimrizationsii [Industrial Polymerization process Modelling], Moscow: khimia, 1979.
2. Fedorenko R.P. Vvedenie v vychislitel'nyu fiziku [Introduction to computational Physics], Moscow, MFTI, 1994.
3. Yang L. Lekcii po variacionnomu ischisleniju i teorii optimal'nogo upravlenija [Lectures on the Calculus of Variations and optimal Control Theory]. London: Saunders, 1969. Moscow: Mir, 1974.
4. Podvalny S.L. Informatsionno-upravlyayushchie sistemy monitoring slozhnykh ob'ektov [Information and Control Systems of Complex Objects Monitoring], Voronezh:Nauchnaya kniga, 2010
5. Ostrovskii G.M., Volin Yu.M., Ziyatdinov N.N. Optimizatsiya v khimicheskoi tekhnologii [Optimization in chemical Technology], Kazan: Fen,2004.
6. Podvalny S.L. Sopryazhennyye sistemy i gradient pri optimizatsii dinamicheskikh sistem [Adjoint Systems and Gradient in Dynamic Systems Optimization]. Vestn. Voronezh.Gos.Tekh.Univ., 2012, vol.8, no.12-1, pp.57-62.
7. Podvalny S.L. Reshenie zadach gradientnoj optimizatsii kaskadno-reaktornykh shem s ispol'zovaniem sopryazhennykh sistem [Solution of Gradient Optimization Problems for Cascade Reactor Schemes Using Adjoint Systems], Vestn. Voronezh. Gos. Tech. Univ.,2013, vol. 9, no. 2, pp. 27-32.
8. Podvalny S.L. Mnogoal'ternativnye sistemy: obzor i klassifikatsiya [Multi-alternative systems : a Review and Classification], Sist. Upravlen. Inform. Technol., 2012, vol. 48, no. 2,pp. 4-13.
9. Podvalny S.L., Vasiljev E.M. Mnogoal'ternativnoe upravlenie otkrytymi sistemami: koncepcija, sostojanie i perspektivy [A Multi-alternative Approach to Control in Open Systems :Origins, Current State and Future Prospects], Upravlen. Bolsh.Syst., 2014, no.48, pp.6-58.
10. Ledeneva T.M., Podvalny S.L. Modelirovanie ocenochnykh sistem na osnove principa mnogoal'ternativnosti [Estimative modeling Systems on the Base of Multi-alternativeness] Syst. Upravlen. Inform. Technol. 2014, vol. 57, no. 3.1, pp.155-161.
11. Podvalny S.L., Osobennosti poiskovoj gradientnoj optimizatsii slozhnykh objektov s ispol'zovaniem sopryazhennykh sistem [Search Engine Features in Gradient Optimization of Complex Objects Using Adjoint Systems], Syst. Upravlen. Inform. Technol. 2014, vol. 56., no.2., pp.18-22.
12. Podvalny S.L., Barabanov A.V. Modul'naja struktura sistemy mnogoal'ternativnogo modelirovanija processov polimerizatsii The Modular Structure of the Systems Multi-alternative modeling of Polymerization Processes.,Vestn. Voronezh. Gos. Techn.Univ.2013.vol.9, no.5-1.,pp.41-43.
13. Podvalny S.L., Provotorov V.V. Optimizatsiya po startovym uslovijam parabolicheskoi sistemy s raspredelemnymi parametrami na grafe [Optimization of Initial Conditions with Distributed Parameters on the graph], Syst.Upravlen. Inform. Technol.,2014.,vol.58.,no.4, pp.70-74.
14. Podvalny S.L., Vasiljev E.V. Modeli mnogoal'ternativnogo upravlenija i prinjatija reshenij v slozhnykh sistemah [A Model of multi-alternative control and Decision – making in Complex Systems],Syst. Upravlen. Inform. Technol., 2014., vol.56.,no.2.1.,pp.169-173.
15. Ledeneva T.M., Podvalny S.L.,Vasiliev V.I. Sistemy iskusstvennogo intellekta i prinjatija reshenij [Artificial intelligence Systems and Decision-making], Ufa: Ugatu.,2005.

16. Podvalny S.L., Vasiljev E.M. Jevoljucionnye principy postroenija intellektual'nyh sistem mnogoal'ternativnogo upravlenija [Evolutionary principles of Intelligent systems multi-alternative Control], syst. Upravlen. Inform. Technol., 2014, vol.57., no.3., pp.4-8.
17. Makhortov S.D., Podvalny S.L. Algebraicheskiy podhod k issledovaniju i optimizacii baz znaniy produkcionnogo tipa [Algebraic Approach to the Study and Optimization of a Production Database Type], Inform. Technol.2008., no.8.,pp.55-60.
18. Podvalny S.L., Ledeneva T.M. Mnogoal'ternativnost' kak osnova obespechenija intellektual'nosti sistem upravlenija [The Multi-alternativeness Property as the Basis for Control Systems Intelligence]. Vestn. Voronezh. Gos. Techn. Univ.2012, vol.11., pp.17-23.
19. Podvalny S.L., Provotorov V.V. Opredelenie startovoj funkcii v zadache nabljudenija parabolicheskoj sistemoj s raspredelennymi parametrami na grafe [The definition of the Starting Function in the problem of Observation of a Parabolic Systems with Distributed parameters on the Graph], Vestn. Voronezh. Gos. Techn. Univ.2014.,vol.10., no.6, pp.29-35.
20. Podvalny S.L., Provotorov V.V. Upravljaemost' differencial'noj sistemy parabolicheskogo tipa s raspredelennymi parametrami na grafe [Controllability for Differential Systems of parabolic with Distributed Parameters on the graph], Vestn. Voronezh. Gos. Techn. Univ. 2015.,vol.11., no.3., pp.49-56.
21. Podvalny S.L., Provotorov V.V. Zadacha optimizacii differencial'nyh sistem s ispol'zovaniem sopriazhennyh sostojanij [The Problem of Optimization of differential Systems using the Conjugated States], Vestn. Voronezh. Gos. Techn. Univ.2016, vol.12, no.2, pp.26-34.

РАСЧЁТНЫЙ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ПРОФИЛИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

А.В. Кретинин, А.В. Иванов, Д.Н. Галдин

В статье проведён расчётный сравнительный анализ энергетической эффективности нескольких вариантов рабочих колёс центробежного насоса. Рассматриваются три различных варианта профилирования формы лопасти рабочего колеса, определяемые углами установки на входе и на выходе. Первый вариант основан на использовании дуги окружности для определения средней линии лопатки. Во втором варианте рассмотрен случай применения параболы. В третьем случае использован метод профилирования лопаток по точкам. В качестве уравнения спирали была задана зависимость плавного изменения котангенса угла установки лопатки от расстояния до оси вращения насоса. При рассмотрении вариантов профилирования меридиональный профиль рабочего колеса оставался неизменным. Геометрия подводящего и отводящего устройств оставалась постоянной при всех проведённых численных исследованиях

Ключевые слова: центробежный насос, рабочее колесо, ANSYS, гидродинамические процессы

Введение

Одной из наиболее актуальных проблем в машиностроении является повышение энергетической эффективности различных машин и агрегатов. Центробежные насосы (ЦН) широко распространены практически во всех областях промышленности. В ЦН подача рабочего тела с заданными давлением и расходом происходит благодаря центробежной силе, создаваемой в результате воздействия лопаток рабочего колеса на перекачиваемую жидкость.

В настоящее время существует множество различных методик профилирования лопаток рабочего колеса ЦН. Они дают возможность получить достаточно хорошие результаты, однако всегда требуется оптимизация конструкции и адаптация методик для каждого конкретного типа насосов. В работе проведён анализ трёх различных способов построения профиля лопатки.

Как указывается в [1], вероятно, наиболее простым и распространённым способом профилирования лопаток является использование дуг окружностей. Вариацией данного способа служит построение средней линии лопатки с использованием одной дуги окружности. При таком построении профиль средней линии лопатки полностью определяется углами установки лопатки на входе и на выходе (β_1 и β_2) и радиусами начала и конца лопатки.

Альтернативным способом построения средней линии является использование параболы, построение которой описано в работах [2-4]. Конформное отображение линии пересечения поверхности тока со средней поверхностью лопатки на развёртку цилиндра состоит из двух прямых и дуги окружности. Для задания формы средней линии этим способом

можно использовать такие переменные как углы β_1 и β_2 , а также длины прямых линий.

В настоящей работе сравнение различных вариантов профилирования производилось с использованием трёхмерного численного моделирования гидродинамических процессов в проточной части центробежного насоса с помощью модуля вычислительной гидрогазодинамики ANSYS CFX 15. Этот программный продукт позволяет проводить численный эксперимент с достаточной степенью точности согласования результатов с физическим экспериментом. Высокая степень согласования достигается за счёт выбора корректных параметров моделирования, таких как: качество расчётной сетки, граничные условия, модель турбулентности.

В математической модели в качестве определяющих уравнений использовались:

Уравнение неразрывности -

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial y_i} = 0, \tag{1}$$

где u_i - радиальная составляющая скорости жидкости;

v_i - тангенциальная составляющая скорости жидкости;

x, y – декартовы координаты.

Уравнение количества движения вида

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_i) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] = 2\varepsilon_{ijk} \Omega_j U_k + \Omega_j x_j - \Omega_i \Omega_j x_i, \tag{2}$$

где U - средний компонент скорости;

Ω - вектор вращения;

ε_{ijk} - тензор векторного произведения

Турбулентная вязкость по уравнению:

$$\nu_i = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \tag{3}$$

где ν_i - кинематическая вязкость;

Кретинин Александр Валентинович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8 (473) 252-34-52, e-mail: avk-yrn@mail.ru

Иванов Андрей Владимирович - ВГТУ, д-р техн. наук, доцент, тел. 8 (473) 234-64-84, e-mail: iav308@inbox.ru

Галдин Дмитрий Николаевич – ВГТУ, ассистент, тел. 8(473) 252-34-52, e-mail: dmgaldin@yandex.ru

c_μ - константа k - ε модели = 0,09;
 k - турбулентная кинетическая энергия;
 ε - скорость диссипации.

Использовалась k - ε модель турбулентности, в которой турбулентная кинетическая энергия и скорость диссипации рассчитываются из уравнений (4) и (5) [5].

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] = \nu_i \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] = \\ = c_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - c_2 \frac{\varepsilon^2}{k}. \end{aligned} \quad (5)$$

где σ_k и σ_ε - числа Прандтля и Шмидта соответственно равные 1,0 и 1,3;

c_1 и c_2 - коэффициенты в k - ε модели, равные 1,44 и 1,92 соответственно.

В качестве исходной модели для исследования выступал серийно изготавливаемый горизонтальный центробежный насос консольного типа с подачей 50 м³/ч и напором 50 метров, при частоте вращения 2950 об/мин. Профиль меридионального сечения рабочего колеса этого насоса был использован для построения 3D моделей проточных частей. Диаметры на входе и на выходе из рабочего колеса оставались постоянными для всех вариантов профилирования лопаток. На рис. 1 представлен меридиональный профиль рабочего колеса с условным обозначением геометрических размеров.

CFD моделирование центробежного насоса начиналось с создания геометрии рабочих колёс и отводящего устройства. Построение производилось в модуле ANSYS Design Modeler. Расчётные исследования проводилось для четырёх различных вариантов рабочих колёс. Были построены 4 различные модели рабочего колеса и одна, общая для всех вариантов профилирования, модель спирального отвода. Следует отметить, что оптимизация отводящего устройства с точки зрения гидравлических характеристик не выполнялась. Для всех моделей рабочего колеса была использована лопатка с постоянной толщиной. Это условие использовалось из соображений простоты построения модели, а также для обеспечения сравнения профилей в сходных условиях при расчётном моделировании. Для всех лопаток задавались одинаковые углы установки на входе и на выходе, а также радиусы начала и конца лопатки.

На рис. 2 представлена модель проточной части рабочего колеса, спрофилированная дугой окружности. Для её построения были заданы углы β_1 и β_2 , радиусы начала и конца лопатки. После задания этих параметров модель стала полностью определённой.

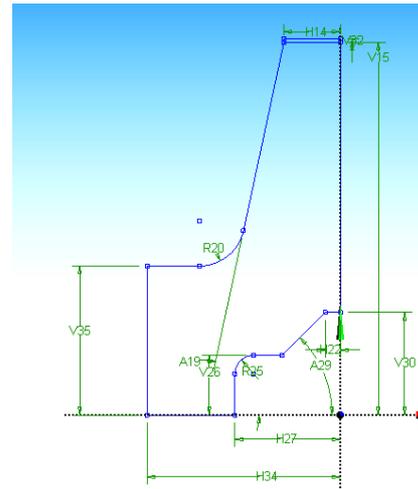
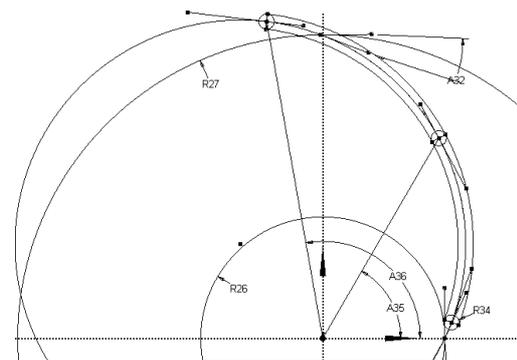
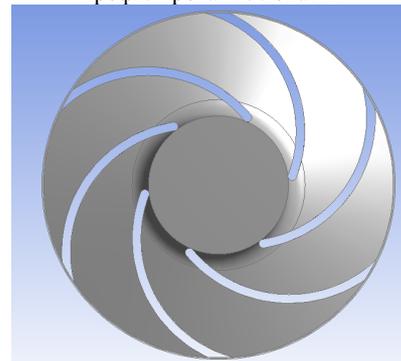


Рис. 1. Меридиональный профиль рабочего колеса с условным обозначением размеров

На рис. 3 и 4 изображены модели рабочих колёс, построенные по методикам, описываемых в работах [2-4].



Профилирование лопатки

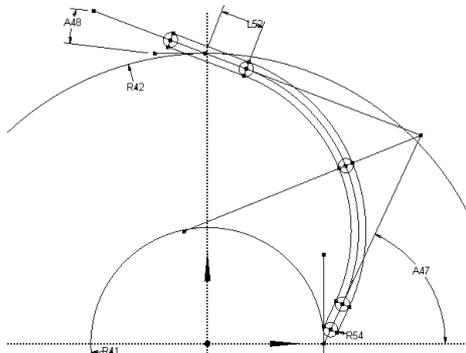


Твердотельная модель проточной части РК

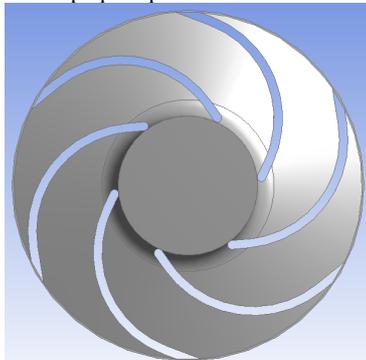
Рис. 2. Рабочее колесо с лопаткой, спрофилированной по дуге окружности

В отличие от модели с использованием дуги окружности появилась необходимость задания ещё одной переменной, а, именно, длины прямолинейного участка (при условии равенства длин отрезков согласно рекомендациям). Было создано две модели с различными значениями этого параметра для сравнения результатов расчётов (в варианте 2 длина прямой линии больше на 33% чем в варианте 1).

На рис. 5 приведена модель, построенная с использованием метода профилирования лопаток по точкам. В качестве уравнения спирали была задана зависимость плавного изменения котангенса угла установки лопасти от расстояния до оси вращения насоса.

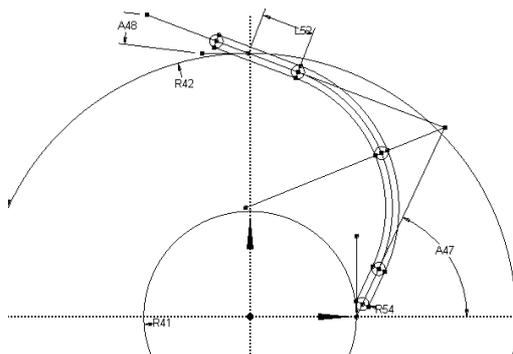


Профилирование лопатки



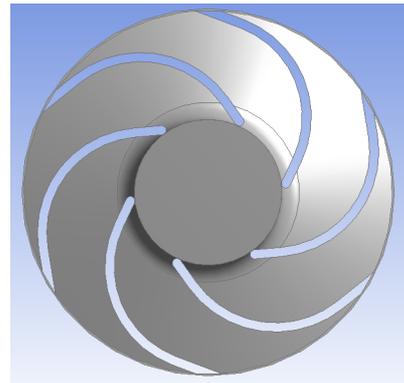
Твердотельная модель проточной части

Рис. 3. Рабочее колесо «вариант 1»



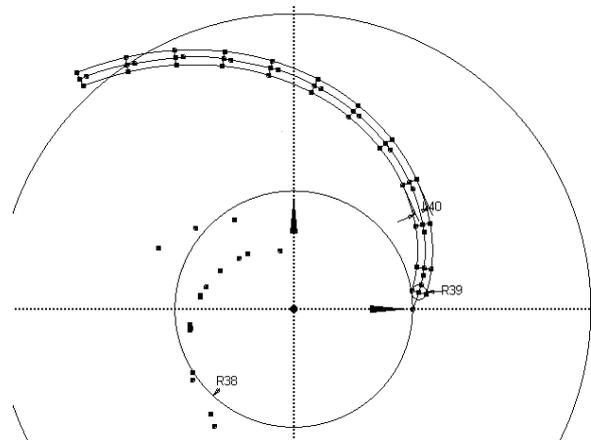
Профилирование лопатки

Рис. 4. Рабочее колесо «вариант 2»

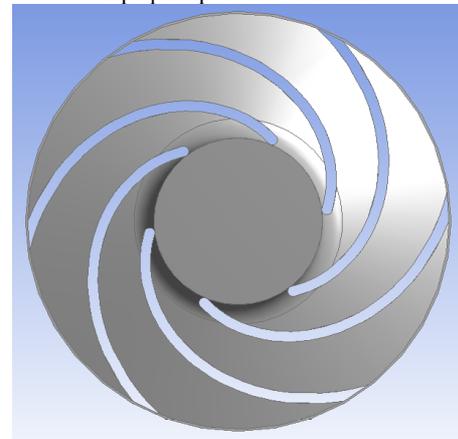


Твердотельная модель проточной части

Рис. 4. Рабочее колесо «вариант 2» (продолжение)



Профилирование лопатки



Твердотельная модель проточной части

Рис. 5. Рабочее колесо с профилированием лопаток сплайном

Сеточные модели рабочих колёс генерировались в модуле ANSYS Meshing с идентичными параметрами для корректного сравнения результатов вычисления. Каждая сеточная модель вариантов проточной части центробежного насоса (рабочее колесо и отвод) содержала около 2 млн. ячеек. На рис. 6 представлена расчётная модель проточной части центробежного насоса.

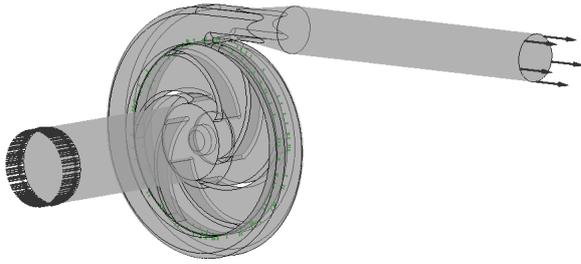


Рис. 6. Расчётная модель

После того как сеточные модели были сформированы на их основе создавались расчётные модели в модуле CFX-Pre с одинаковыми граничными условиями. Моделирование производилось в стационарной постановке. В качестве модели турбулентности была использована $k-\varepsilon$ модель. Граничные условия на входе - массовый расход, на выходе - статическое давление. Для всех моделей использовалась одинаковая скорость вращения и типы интерфейсов между рабочим колесом и отводом (интерфейс Frozen rotor). Сравнение профилей проводилось по гидравлическому КПД насоса в предположении, что механический, объёмный и дисковый КПД для всех вариантов профиля лопатки - идентичны.

Решения проводились до достижения двух условий. Первое условие - значения среднеквадратичных невязок (RMS) достигают значения ниже 10^{-5} . Второе условие - графики расчётных интегральных величин (напор и гидравлический КПД насоса) выходят на горизонтальную линию, или изменяются очень незначительно. Графики сходимости представлены на рис. 7.

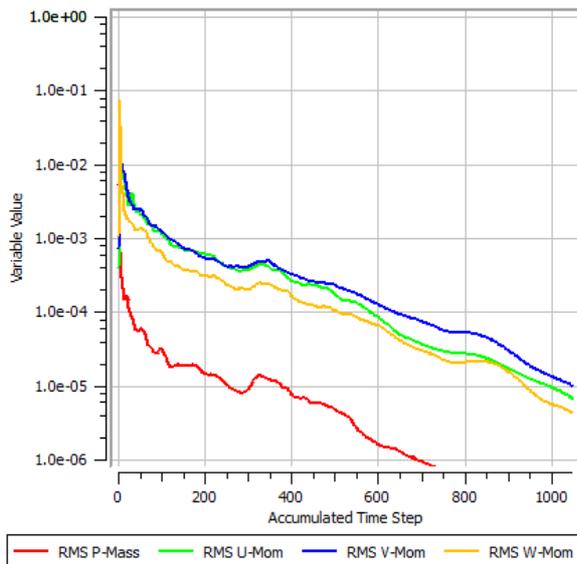


График сходимости решения

Рис. 7. Графики сходимости решения

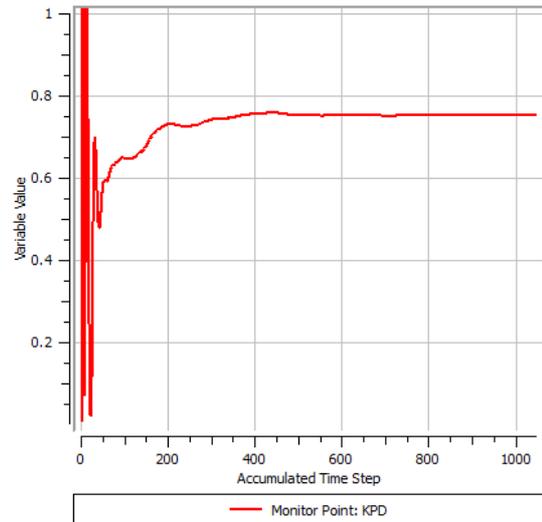


График расчётного значения гидравлического КПД

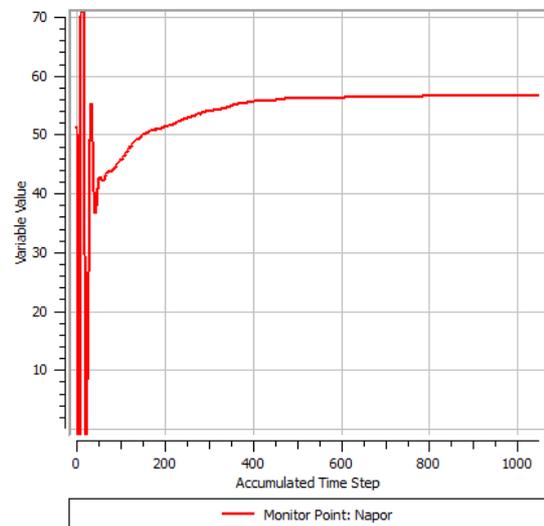


График расчётного значения напора

Рис. 7. Графики сходимости решения (продолжение)

В результате численного моделирования были получены результаты, которые представлены в таблице.

Результаты моделирования

| Вариант профилирования рабочего колеса | Напор, [м] | Гидравлический КПД |
|--|------------|--------------------|
| Средняя линия по дуге окружности | 57,484 | 0,732 |
| Средняя линия по параболе, вариант 1 | 56,669 | 0,753 |
| Средняя линия по параболе, вариант 2 | 56,034 | 0,757 |
| Средняя линия по сплайну | 55,008 | 0,784 |

На рис. 8 представлены векторы скоростей для различных вариантов профилирования рабочего колеса.

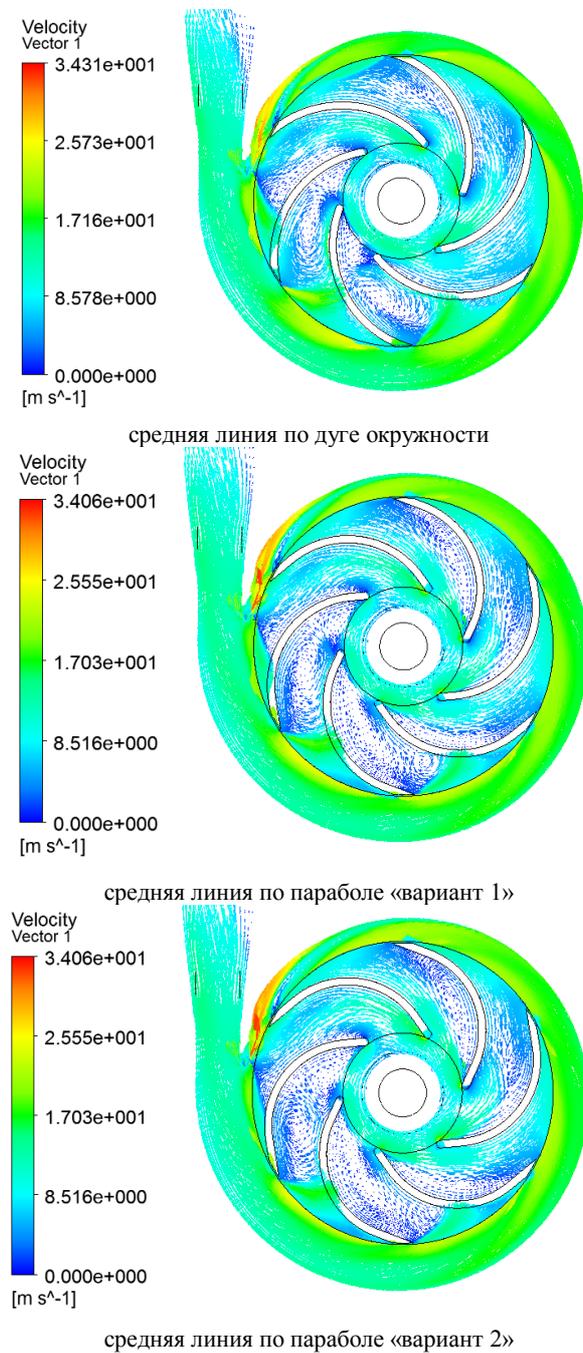


Рис. 8. Векторы скорости

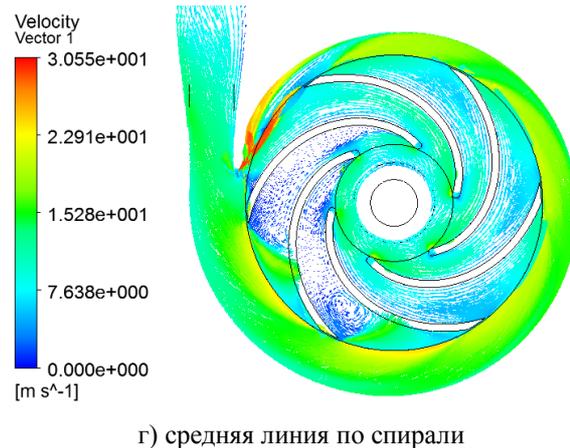


Рис. 8. Векторы скорости (продолжение)

Заключение

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что гидравлический КПД насоса минимален при профилировании средней линии лопатки дугой окружности. Более эффективным методом является построение профиля лопатки по параболе, причём следует отметить, что длина прямой линии существенно влияет на характер движения жидкости по межлопаточному каналу. При уменьшении длины прямой линии форма лопатки будет приближаться к дуге окружности, а при увеличении наблюдается отрыв потока от корытца лопатки, что влечёт за собой дополнительные потери. Этот способ профилирования требует детального подбора параметров при профилировании для достижения оптимального результата.

Наибольшую эффективность из четырёх рассмотренных вариантов показал метод построения по точкам, задающих сплайн. Помимо наибольшего значения гидравлического КПД, данный метод обеспечивает хорошее распределение скоростей в межлопаточном канале.

Литература

1. Иванов, А.В. Турбонасосные агрегаты кислородно-водородных ЖРД [Текст]: монография / А.В. Иванов. - Воронеж: ГОУВПО «ВГТУ», 2011. - 284 с.
2. Автоматизированное проектирование центробежного насоса [Текст]: методическое пособие / С.С. Панаиотти [и др.]; под ред. С.С. Панаиотти. - Калуга: КФ МГТУ, 2001. - 44 с.
3. Мелашенко, В.И. Профилирование лопастей рабочих колес центробежных насосов [Текст] / В.И. Мелашенко, А.В. Зуев. - М.: МВТУ, 1980. - 52 с.
4. Руднев, С.С. Методическое пособие по курсовому проектированию лопастных насосов [Текст] / С.С. Руднев, И.В. Матвеев. - М.: МВТУ, 1974. - 72 с.
5. Ruprecht, A Parallel Computation of Stator-Rotor Interaction in an Axial Turbine // ASME PVP Conference, CFD Symposium [Boston, 1999]. - Boston: 1999. p. 1-9.

CALCULATION COMPARISON OF VARIANTS FOR PROFILING CENTRIFUGAL PUMP IMPELLER

A.V. Kretinin, professor of Oil and Gas Equipment and Transportation Department of Voronezh State Technical University, Doctor of Science (Engineering), full professor, Voronezh, Russian Federation, e-mail: avk-vrn@mail.ru.

A.V. Ivanov, Professor of Rocket Department of Voronezh State Technical University, Doctor of Science (Engineering), associate professor, Voronezh, Russian Federation e-mail: Iav308@inbox.ru

D.N. Galdin, postgraduate student at the Oil and Gas Equipment and Transportation Department of Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: dmgaldin@yandex.ru.

The comparison of several versions of impeller of the centrifugal pump is carried out in this article. Considered Three different variants of form profiling of the impeller blade, determined by the installation angles on an inlet and at the outlet. The first option is based on the circle arch usage for definition of the blade mean line. The case of parabola applications is considered in the second option. In the third case the method of paddle profiling on points was used. The dependence of smooth changing of blade installation angle cotangent from the distance to the axis rotation has been given as the spiral equation In this specific case the meridional profile of the impeller remained invariable. Geometry of inlet and volute remained constant for all numerical solutions

Key words: centrifugal pump, impeller, ANSYS, hydrodynamic processes

References

1. Ivanov A.V. Turbonasosnye agregaty kislородno-vodorodnyh ZHRD: monografiya [Turbopump unit oxygen-hydrogen rocket engine: monograph] - Voronezh: GOUVPO «VGTU», 2011. - 284 p.
2. Panaiotti S.S. Avtomatizirovannoe proektirovanie centrobezhnogo nasosa: metodicheskoe posobie [Automated design of centrifugal pump: methodical manual] – Kaluga: KF MGTU, 2001. – 44 p.
3. Melashchenko V.I., Zuev A.V. Profilirovanie lopastej rabochih koles centrobezhnyh nasosov [Profiling the blades of the impeller] – Moscow.: MVTU, 1980. – 52 s.
4. Rudnev S.S., Matveev I.V. Metodicheskoe posobie po kursovomu proektirovaniyu lopastnyh nasosov [Methodical manual for the course project on centrifugal pumps] – Moscow.: MVTU, 1974. – 72 s.
5. Ruprecht, A Parallel Computation of Stator-Rotor Interaction in an Axial Turbine // ASME PVP Conference, CFD Symposium [Boston, 1999]. – Boston: 1999. p. 1-9.

СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОТДЕЛЕНИЯ ГРУЗА ИЗ ОТСЕКА САМОЛЕТА-НОСИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ МНОГОИМПУЛЬСНОГО МОМЕНТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОПЕРЕЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ

В.А. Нестеров, А.П. Будник, И.М. Семенов

В статье рассматривается методика построения системы газодинамического управления на базе моментного двигателя поперечного управления, которая обеспечивает гарантированное отсутствие столкновения груза с внутренними элементами отсека самолета-носителя, а также осуществляет пространственную стабилизацию груза до момента раскрытия рулевых поверхностей. Для численного анализа безопасности отделения груза и эффективности системы газодинамического управления создана модель пространственного движения груза из отсека самолета-носителя от момента разрыва жесткой связи с самолетом-носителем до момента раскрытия рулевых поверхностей. Данная модель дает возможность получить все необходимые параметры, что позволяет оценить безопасность отделения груза на различных режимах полета самолета-носителя.

Для подтверждения эффективности применения моментного двигателя поперечного управления при построении системы газодинамического управления в статье приведены результаты моделирования отделения груза на различных режимах полета самолета-носителя

Ключевые слова: безопасность отделения, газодинамическая стабилизация, отсек носителя, управление отделением, моментный двигатель поперечного управления

1. Введение

В последние годы в мире повысился интерес к самолетам, у которых внутрифюзеляжные точки подвески грузов являются основными. Главной проблемой, связанной с этой особенностью, является безопасность отделения управляемых грузов из отсека на скоростях больше скорости звука. Одним из путей обеспечения безопасности отделения данных грузов в настоящее время становится использование автономных импульсных двигателей поперечного управления (МДПУ) [1,2].

Ракетные двигатели твердого топлива (РДТТ) широко применяются в современной технике благодаря своим эксплуатационным преимуществам, заключающимся в надежности действия, простоте хранения, безопасности, отсутствии агрегатов подачи компонентов топлива, что влечет за собой простоту конструкции и относительно малую стоимость. Ведутся работы по созданию новых видов твердого топлива с более высокими скоростями истечения газов и улучшенными энергетическими характеристиками, разработке систем управления тягой двигателя, улучшению характеристик твердых топлив.

В настоящее время, особое внимание уделяется совершенствованию методов и способов управления полетом беспилотными летательными аппаратами (БЛА) при помощи создания боковых

управляющих усилий. Технические решения по способам управления процессами работы РДТТ приведены в работе И.М. Соколовского [3].

Использование газодинамического управления обусловлено режимами полета, когда аэродинамические способы управления либо вообще неприменимы, либо не обеспечивают необходимого быстродействия и реализации располагаемых перегрузок.

Достоинством газодинамического управления является: высокое быстродействие, широкие энергетические возможности, независимость от внешней среды и пространственного положения носителя.

В книгах И.С. Голубева [4,5] рассмотрены особенности проектирования вспомогательных силовых систем, работающих на твердом топливе, а также газодинамические способы создания сил и моментов для управления полетом БЛА. Обзор существующих систем газодинамического управления, а также предполагаемые характеристики МДПУ приведены в статье Е.Г. Болотова и Б.Я. Мизрохи [6].

В зарубежной литературе все чаще появляются сведения о том, что для повышения маневренности БЛА, разрабатываются двигатели поперечного управления, не связанные с маршевым двигателем [7].

Решение задачи безопасности отделения при внутрифюзеляжном размещении груза содержит два аспекта, которые в итоге формируют требования к системе, обеспечивающей безопасное отделение груза от самолета-носителя (СН):

- отделение груза от СН без соударения с самим самолетом, устройствами принудительного отделения (УПО) и подвешенными на соседних точках подвески грузами;

- сохранение пространственной устойчивости груза при движении после отделения от СН, с це-

Нестеров Виктор Антонович – МАИ (НИУ), д-р техн. наук, профессор, тел. 8(909) 980-38-21

Будник Александр Павлович - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(473) 249-53-24.

Семенов Игорь Михайлович - ЗАО "РАА "Спецтехника", канд. техн. наук, ведущий инженер, тел. 8(916) 748-14-50, e-mail: s1m@mail.ru

лью устранения вероятности столкновения нештатно-управляемого груза с СН или соседними самолетами в группе.

Внутрифузеляжное размещение груза со сложенными рулевыми поверхностями способствует появлению ряда противоречий. Во-первых, внутрифузеляжное размещение позволяет обеспечить малозаметность снаряженного СН, но при этом увеличивает строительную высоту самого СН. Во-вторых, внутрифузеляжное размещение позволяет снизить аэродинамическое воздействие на груз при транспортировании, но при этом увеличивает потребный ход принудительного сопровождения груза при его отделении. В-третьих, внутрифузеляжное размещение неизбежно увеличивает время отделения груза от СН за счет времени, необходимого на открытие створок отсека и раскрытие рулей.

Учитывая, что предпосылки к летным происшествиям имели место при отработке в летных испытаниях, а также анализируя применение и преимущества газодинамического управления, было предложено применить современные технологии поперечного газодинамического управления для решения задачи безопасности принудительного отделения перспективных грузов.

Поэтому задачи построения системы газодинамического управления на базе МДПУ и математической модели пространственного движения груза с системой газодинамического управления из отсека СН являются весьма актуальными.

2. Постановка задачи

Постановка задачи кратко описана в предыдущей статье [2]. Однако необходимо рассмотреть некоторые аспекты проблемы, связанные с вероятностной природой действующих при старте груза знакопеременных сил и моментов, которые вносят существенный вклад в траекторию движения груза, что может привести к столкновению с носителем или срыву автопилота груза из-за резкого ухода. Если груз выходит из отсека с небольшим углом атаки, то возникает момент в сторону увеличения угла атаки. Чем выше скорость, тем больше момент. Эффективность рулей в данном случае мала, а двигатель запускать опасно из-за влияния выхлопной струи на отсек. Даже если груз выходит из отсека строго параллельно оси летательного аппарата, его все равно разворачивает из-за взаимодействия оживальной или конической головной части со слоем смещения (рис. 1).

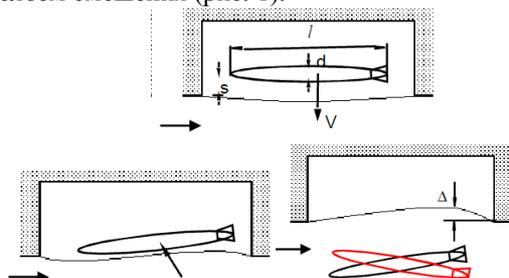


Рис. 1. Влияние слоя смещения на угол атаки груза

Эту проблему частично можно решить выдвинув груз за пределы слоя смещения. Однако, проблему прохождения груза сквозь конический скачок уплотнения выдвигные устройства не решают. Взаимодействие головной части груза с фронтом ударной волны вызывает появление момента, вращающего груз в сторону носителя.

Ситуация усложняется также наличием низкочастотных колебаний в отсеке с открытыми створками, возникающих на сверхзвуковых скоростях. При их изучении [8] было выявлено, что низкочастотные колебания носят характер бегущих ударных волн, это означает, что при определенном сочетании параметров набегающего потока и геометрии отсека стационарное течение в отсеке существовать не может.

Таким образом, течение во внутренних отсеках имеет вероятностный характер, что приводит к проблеме прогнозирования траектории движения отделяемого груза, особенно имеющих сложенные аэродинамические рули. Данное обстоятельство во многом определяет применение дополнительного быстродействующего управления отделением груза с помощью МДПУ.

3. Моментный двигатель поперечного управления

Анализ двигателей поперечного управления (ДПУ) показывает, что для модификации существующих грузов внутрифузеляжного размещения, с целью обеспечения безопасности отделения из отсека, целесообразно применение газодинамических способов создания сил и моментов с помощью автономных многоимпульсных ДПУ моментного управления. Не вдаваясь в детальные количественные оценки, необходимо отметить качественное различие в безопасности отделения груза с традиционным аэродинамическим и новым газодинамическим способом управления. Последний способен обеспечить высокую безопасность отделения груза из отсека СН на участке полета груза со сложенными рулями.

Реализация данного способа выполнена в виде отсека, в котором размещается ДПУ не связанный с маршевым двигателем. ДПУ по сигналу бортовой системы управления формирует необходимую поперечную тягу.

МДПУ представляет собой импульсную двигательную установку (рис. 2), в которой радиально расположены несколько малоразмерных импульсных микродвигателей твердого топлива (рис. 3а), равномерно размещенных на корпусе перпендикулярно продольной оси груза на достаточном расстоянии от ее центра масс. Для управления грузом по крену в процессе ее отделения использована серия двигателей пониженной тяги (рис. 3б) с соплами, направленными по касательной к корпусу груза. Кроме этого, в состав МДПУ входит электронный коммутатор включения микроРДТТ, установленный в заднем торце МДПУ.

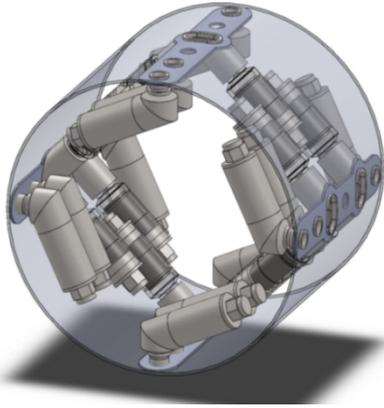


Рис. 2. Конструктивный облик отсека МДПУ

Из соображений компоновки МДПУ микроРДТТ имеет корпус цилиндрической формы (рис. 4). В камере находится моноблочный пороховой заряд из сверх быстрогорящего смесового топлива, прочно скрепленный с ее стенками. На переднем днище расположен электровоспламенитель, а на заднем – сопловой блок невысокой степени расширения со сверхзвуковой частью конической формы.

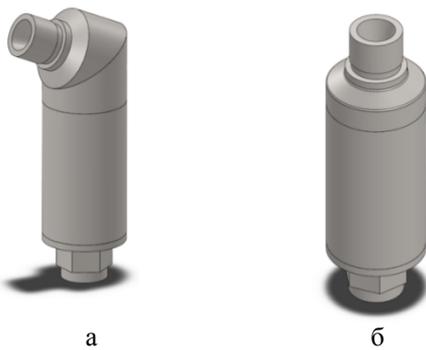


Рис. 3. Исполнения микроРДТТ:
а) импульсный двигатель управления по тангажу и рысканию; б) импульсный двигатель управления по крену

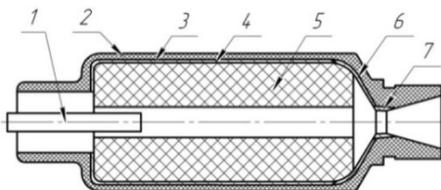


Рис. 4. МикроРДТТ:
1- воспламенитель; 2- графитэпоксидный корпус; 3 – алюминиевый корпус; 4 – внутренняя теплозащита; 5 – топливо; 6 – стальное днище; 7 – сопловой вкладыш.

МДПУ осуществляет управление грузом по трем каналам в процессе его отделения из внутрифузеляжного отсека СН. В зависимости от требуемых компенсирующих сил и моментов системой управления вырабатывается сигнал для запуска

соответствующих микроРДТТ в требуемом направлении.

Удаление МДПУ от центра масс АУР может быть осуществлено размещением МДПУ как в носовой части, так и в хвостовой части груза. Конкретный выбор будет зависеть от компоновки груза, его аэродинамической схемы, а также от особенностей обтекания груза при работе МДПУ. Во всех случаях применения МДПУ следует учитывать негативное взаимодействие возмущенной выхлопной струей МДПУ воздушного потока с элементами конструкции, а также влияние изменений в аэродинамике груза, происходящих при работе двигателей поперечного управления, на управление груза.

При выборе расположения МДПУ необходимо учитывать, что при выдуве реактивной струи перпендикулярно продольной оси груза, т.е. практически перпендикулярно набегающему сверхзвуковому потоку, воздушный сверхзвуковой поток, набега на поперечную выхлопную струю, тормозится. Перед струей образуются интенсивный скачок уплотнения, а на боковой поверхности корпуса – область повышенного давления. За соплом образуется область разрежения. Эта область пониженного давления может быть различной протяженности и мощности в зависимости от направления струи по отношению к углу атаки груза.

Таким образом, самым благоприятным, с точки зрения аэродинамики, является расположение МДПУ в хвостовой части груза, которое минимизирует негативное влияние истекающих струй на аэродинамику

Также следует отметить, что в результате образования зоны повышенного давления перед струей возникает дополнительная аэродинамическая сила на корпусе, направленная в сторону тяги сопла, что увеличивает результирующую силу в 1,5-2 раза и более в зависимости от величины скоростного напора и числа М.

В табл. 1, 2 приведены характеристики МДПУ для перспективного груза, полученные в результате проекторочного расчета.

Таблица 1
Оценочные характеристики единичных импульсных двигателей

| | Продольный канал | Поперечный канал |
|-----------------------------------|------------------|------------------|
| Суммарный импульс тяги, Нс | 420 | 31,5 |
| Максимальная тяга, Н | 7500 | 450 |
| Время работы (среднее), с | 0,056 | 0,07 |
| Длина корпуса/ диаметр, мм | 87/40 | 10/6 |
| Масса двигателя (без топлива), кг | 0,547 | 0,042 |
| Масса топлива, кг | 0,171 | 0,0129 |

Таблица 2
Оценочные характеристики МДПУ

| | |
|-------------------|-------|
| Длина, мм | 300 |
| Масса ИДУ, кг | 17,26 |
| Масса топлива, кг | 3,74 |

При способе создания управляющих сил и моментов системой импульсных микродвигателей выражения для газодинамической силы и создаваемого ею момента записываются через силу и момент от единичного ракетного микродвигателя [9]:

$$F_y = \sum_{i=1}^n P_{yi}; \quad (1)$$

$$M_z = \sum_{i=1}^n P_{yi} (\bar{x}_M - \bar{x}_i)L.$$

Здесь P_{yi} - проекция тяги, создаваемая i -м единичным ракетным двигателем управления на ось ОУ ССКН; \bar{x}_i - относительная координата сопла i -го единичного двигателя управления; n - число включенных единичных двигателей управления; \bar{x}_M - относительная координата центра масса груза; L - расстояние от центра масс груза до МДПУ.

В первом приближении, для плюсообразной схемы уравнения (1) можно представить линейно зависимыми от числа включаемых двигателей:

$$F_y = P_1 n; \quad (2)$$

$$M_z = P_1 (\bar{x}_M - \bar{x}_{ИДУ})L_\phi.$$

Здесь P_1 - тяга единичного импульсного двигателя; $\bar{x}_{ИДУ} = \frac{x_{ИДУ}}{L_\phi}$ - относительная координата центра масс импульсной двигательной установки; $(\bar{x}_M - \bar{x}_{ИДУ})L_\phi = l_{ИДУ}$ - расстояние от центра масс до центра массы импульсной двигательной установки (ИДУ) моментного газодинамического управления (МГДУ); L_ϕ - длина фюзеляжа в [м].

Угловая скорость, создаваемая импульсным микродвигателем, определяется выражением

$$\omega = n\omega_1 = n\dot{\omega}_1\tau_{ИД}, \quad (3)$$

где $\tau_{ИД}$ - среднее время работы микродвигателя; $\dot{\omega}_1$ - угловое ускорение вращения корпуса груза, создаваемое одним единичным микродвигателем

$$\dot{\omega}_1 = \frac{P_1 (\bar{x}_M - \bar{x}_{ИДУ})L_\phi}{I_z} \cdot \left[\frac{1}{c^2} \right], \quad (4)$$

I_z - момент инерции груза в [кг · м²].

Угол атаки, создаваемый n микродвигателями за время T , определяется

$$\alpha_{МГДУ}(T) = \frac{n}{2} \omega_1 (T - \tau_{ИД}). \quad (5)$$

4. Моделирование динамики отделения груза с МДПУ

Для подтверждения эффективности применения МДПУ необходимо провести моделирование отделения АУР на режимах полета СН, на которых не обеспечиваются условия безопасности отделения.

Модель коммутатора импульсных двигателей с обратной связью по датчику угловой скорости

представлена на рис. 5. Подсистема интерполяции результатов продувок приведена на рис. 6. Модель динамики отделения груза с МДПУ представлена на рис. 7.

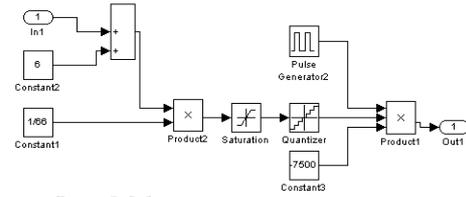


Рис. 5. Модель коммутатора импульсных двигателей в поперечном канале

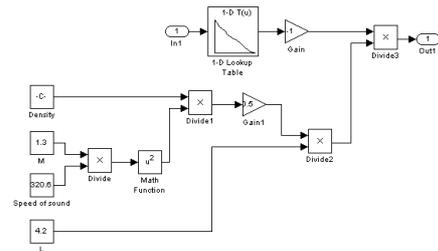


Рис. 6. Подсистема интерполяции аэродинамических коэффициентов

На рис. 8, 9 приведены сравнительные графики параметров отделения груза без МДПУ и с МДПУ на различных режимах полета СН, снижение графиков на рис. 8, 9 показывают работу МДПУ в каждом канале.

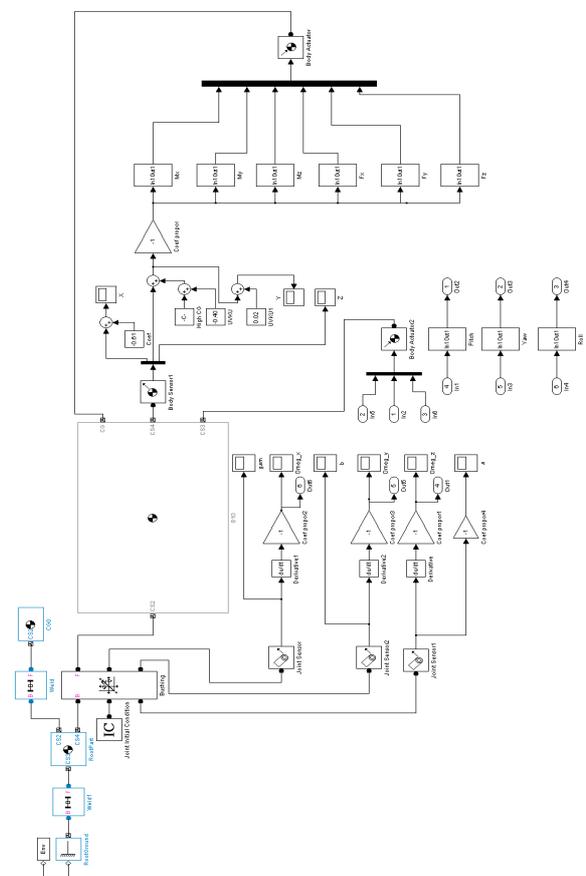


Рис. 7. Модель динамики отделения груза с МДПУ

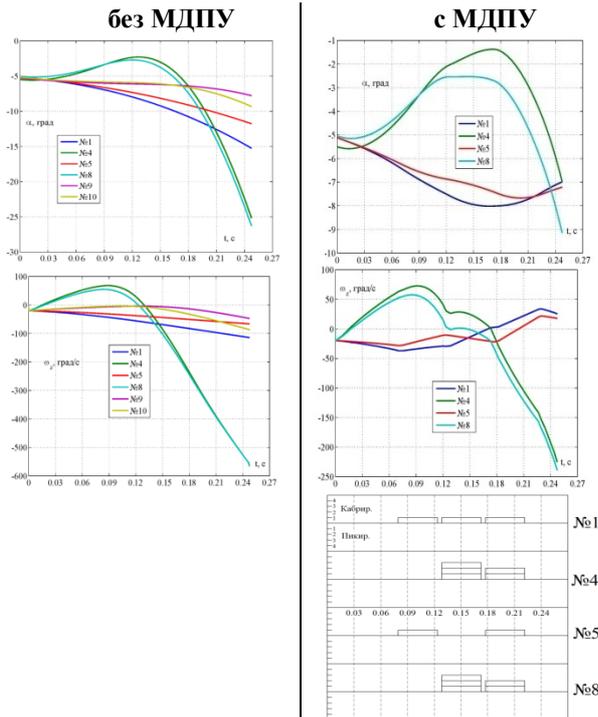


Рис. 8. Угловые координаты и угловые скорости груза в плоскости отделения

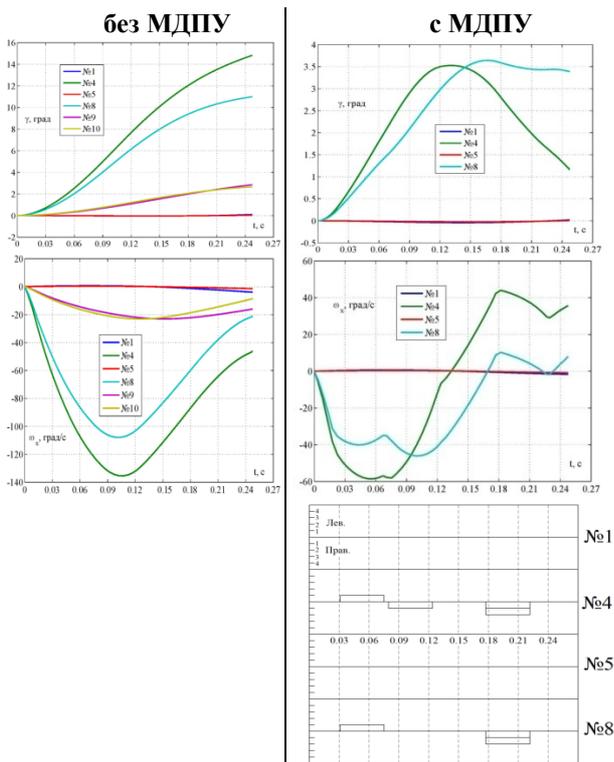


Рис. 9. Угловые координаты и угловые скорости груза канале крена

5. Выводы

1. Результаты моделирования показали, что параметры пространственного движения груза из отсека перспективного самолета-носителя, отвечающие критериям безопасного отделения [2], могут быть обеспечены за счет применения системы газодинамического управления грузом.

2. Основой построения системы газодинамического управления является МДПУ, который имеет простую конструкцию, сравнительно небольшую массу и требует расположения вдали от центра масс на расстоянии, примерно равном расстоянию установки аэродинамических рулей.

3. Для численного анализа безопасности отделения груза и эффективности системы газодинамического управления создана модель пространственного движения груза из отсека СН от момента разрыва жесткой связи с СН до момента раскрытия рулевых поверхностей. Данная модель позволяет получить все необходимые параметры отделения, что позволяет оценить безопасность отделения груза на различных режимах полета СН.

Литература

- Нестеров, В.В. Определение условий безопасного отделения груза из отсека самолета-носителя [Текст] / В.В. Нестеров, В.В. Полянский, И.М. Семенов // Известие ТулГУ. - 2012. - 1. - С. 42-46.
- Нестеров, В.А. Геометрический критерий безопасности отделения груза из отсека самолета-носителя [Текст] / В.А. Нестеров, И.М. Семенов // Вестник МАИ. - 2013. - Т. 20, 5.
- Управляемые энергетические установки на твердом ракетном топливе [Текст] / М.И. Соколовский В.И. Петренко, Г.А. Зыков и др. - М. : Машиностроение, 2003. — 465 с.
- Голубев, В.Г. Проектирование зенитных управляемых ракет [Текст] / В.Г. Голубев, И.С. Светлов. - М. : МАИ, 2001. - 730 с.
- Голубев, И.С. Беспилотные летательные аппараты [Текст] / И.С. Голубев, И.К. Туркин. - М.: МАИ, 2010. — 654 с.
- Болотов, Е.Г. Новое поколение зенитных управляемых ракет средней дальности [Текст] / Е.Г. Болотов, Б.Я. Мизрохи // Специальный выпуск журнала "Полет" к 50-летию МКБ "Факел". - М., 2003.
- Ma Yue Yue. Agile turn control for air-to-air missile based on reaction jet control system / Ma Yue Yue. // Manufacturing Engineering and Automation. - 2012. - Trans Tech Publications. - Vol. II.
- Булат, П.В. О проблеме запуска ракет из отсека на сверхзвуковой скорости [Текст] / П.В. Булат. - ВОЕНМЕХ, 2012.
- Петраш, В.Я. Расчет параметров и характеристик ЛА с устройствами газодинамического управления [Текст] / В.Я. Петраш, А.И. Коваленко. - М.: МАИ, 2003.

SYSTEM OF SAFE-SEPARATION STORE FROM COMPARTMENT OF AIRCRAFT BASED ON ATTITUDE CONTROL MOTORS

V.A. Nesterov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russian Federation, s1m@mail.ru

A.P. Budnik, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, s1m@mail.ru

I.M. Semenov, Candidate of Technical Sciences, Lead Engineer, Joint Stock Company "RAA "Spectehnika", Moscow, Russian Federation, e-mail: s1m@mail.ru

This article is dedicated to solving the problems of separation of store from compartments of the aircraft using attitude control motors. The article provides a method of creating a system of gas-dynamic control separation of store from compartment of the aircraft, which provides a guaranteed absence of a collision store with an aircraft interior components, as well as ensuring the stabilization of the cargo prior to disclosure control surfaces. For the numerical analysis of the safety separation of store and the efficiency of gas-dynamic control system established model of the movement of store from compartments of the aircraft from the moment of rupture of rigid connection with the aircraft until disclosure control surfaces. This model makes it possible to obtain all the necessary parameters, which allows to evaluate the safety separation of store at various flight conditions of the aircraft.

In order to confirm efficiency of gas-dynamic control separation of store in the article presents the results of this system for various flight conditions of the aircraft

Key words: safe-separation, gas-dynamic stabilization, aircraft compartment, control separation, attitude control motors

References

1. Nesterov V.V. Polyanskii V.V., Semenov I.M. Opredelenie uslovii bezopasnogo otdeleniya gruzha iz otseka samoleta-nositelya [Determination of safety launch of cargo from internal compartment of carrier] // Izvestie TulGU. — 2012. — 1. — pp. 42-46.
2. Nesterov V.A Semenov I.M. Geometricheskii kriterii bezopasnosti otdeleniya gruzha iz otseka samoleta-nositelya [The geometric criteria utilization for safe cargo detachment from aircraft compartment process development] // Vestnik MAI. — M., 2013. — T. 20, 5.
3. Sokolovskii M.I. Petrenko V.I., Zykov G.A. i dr. Upravlyaemye energeticheskie ustanovki na tverdom raketnom toplive [Managed power plants based on solid rocket fuel] — M. : Mashinostroenie, 2003. — vol. 465.
4. Golubev V.G. Svetlov I.S. Proektirovanie zenitnykh upravlyaemykh raket [Designing anti-aircraft guided missiles] — M. : MAI, 2001. — vol. 730.
5. Golubev I.S. Turkin I.K. Bepilotnye letatel'nye apparaty [Unmanned aerial vehicles] — M. : MAI, 2010. — vol. 654.
6. Bolotov E.G. Mizrokhi B.Ya. Novoe pokolenie zenitnykh upravlyaemykh raket srednei dal'nosti [The new generation anti-aircraft guided missiles, medium-range] // Spetsial'nyi vypusk zhurnala "Polet" k 50-letiyu MKB "Fakel". — Moskva, 2003. — vol. 36.
7. Ma Yue Yue. Agile turn control for air-to-air missile dased on reaction jet control system // Manufacturing Engineering and Automation. — 2012. — Trans Tech Publications. — vol. 22.
8. Bulat P.V. O probleme zapuska raket iz otseka na sverkhzvukovoi skorosti [About the problem of launching missiles from the compartment at supersonic speed] — VOENMEKh, 2012. — pp. 23-27.
9. Petrash V.Ya. Kovalenko A.I. Raschet parametrov i kharakteristik LA s ustroystvami gazodinamicheskogo upravleniya [The calculation of the parameters and characteristics of the aircraft with gas-dynamic control devices] — M.: MAI, 2003. — pp. 56-58.

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ НЕДВОИЧНОЕ LDPC-ДЕКОДИРОВАНИЕ НА ГРАФИЧЕСКОМ ПРОЦЕССОРЕ

А.В. Башкиров, Ю.В. Дьячков, М.В. Хорошайлова

В данной работе предлагается массивно-параллельная реализация недвоичного LDPC-декодера на основе графического процессора (GPU) для достижения большей гибкости и масштабируемости. Реализация отображает алгоритм декодирования Min-Max для графических процессоров параллельной архитектуры. Здесь описаны методология, разделяющая задачу декодирования на гетерогенной платформе, состоящей из центрального процессора и графического процессора. Экспериментальные результаты показывают, что реализация декодера на основе графического процессора позволяет достигнуть высокой пропускной способности, обеспечивая при этом большую гибкость и масштабируемость. Предложенная архитектура была реализована с использованием OpenCL. Эта реализация является гибкой и может быть легко настроена путем корректировки параметров для поддержки различных типов кода, длины кодов. Использован $1/2(620; 310)(3; 6)$ - регулярный GF(32) код LDPC, который широко используется в проведении соответствующих исследований и показывает хорошую производительность коррекции ошибок. Представленный метод в полной мере использует графические процессоры вычислительной мощности для ускорения недвоичных алгоритмов LDPC-декодирования. Приведенные экспериментальные результаты показывают, что предложенный недвоичный низкоплотный декодер на основе реализации графического процессорного устройства может достичь большой производительности, гибкости и масштабируемости

Ключевые слова: недвоичный LDPC-декодер, алгоритм декодирования Min-Max, параллельная архитектура

Введение. Недвоичные низкоплотные коды (LDPC) относятся к классу кодов исправляющих ошибки, построенных в поле Галуа GF(q) для $q > 2$. В качестве расширений двоичных кодов LDPC, недвоичные LDPC коды могут обеспечить лучшую производительность при коррекции ошибок, когда длина кода короткая или средняя, при более высокой сложности декодирования.

Увеличение производительности недвоичных LDPC кодов достигается за счет увеличения сложности декодирования. С момента их введения были предприняты большие усилия, чтобы улучшить производительность декодирования. С одной стороны, некоторые ученые для кодирования применяют методы особого построения недвоичных кодов LDPC с достижением определенных хороших показателей. С другой стороны, многие алгоритмы декодирования и архитектуры декодеров были предложены для уменьшения сложности недвоичных алгоритмов декодирования LDPC. Тем не менее, эти реализации, как правило, предназначены для конкретного типа кода или для фиксированной длины кодового слова, так что они страдают от плохой гибкости и масштабируемости.

Спрос на новые коды и новые алгоритмы декодирования с низкой сложностью для недвоичных LDPC кодов требует огромного количества обширного моделирования. Высокая сложность алгоритмов недвоичных LDPC указывает на то, что цен-

тральный процессор на основе моделирования будет очень медленным в высших порядках полей GF(q), особенно, когда изучаются свойства вероятности ошибок кодов. Блок графического процессора может обеспечить массивно-параллельные вычисления сообщения с многоядерной архитектурой, которая может ускорить процесс моделирования декодирования LDPC в GF(q). Многие реализации на основе графического процессора были предложены для двоичного LDPC декодирования. Тем не менее, из-за резко возросшей сложности алгоритмов декодирования при более высоких порядках поля, реализация недвоичного LDPC декодирования на графическом процессоре по-прежнему остается сложной задачей. В этой статье представлена реализация недвоичного LDPC декодера на графическом процессоре.

Алгоритмы недвоичного LDPC-декодирования. Недвоичный LDPC код может быть представлен с использованием матрицы проверки четности H, которая представляет собой q разреженную с M строками и N столбцами, элементы которых определяются в поле Галуа состоящего из q элементов $(GF(q) = \{0, 1, \dots, q-1\})$. Матрица H может быть представлена в виде графа Таннера. Пусть $M(n)$ обозначает набор проверочных узлов, соединенных с переменным узлом n. Пусть $N(m)$ обозначает набор переменных узлов, соединенных с проверочным узлом m. Вес строки для проверочного узла обозначается как d_r .

Алгоритм декодирования распространения доверия (BP) может быть представлен для GF(q) поля для декодирования недвоичных LDPC кодов. Чтобы уменьшить сложность, были предложены приближенные алгоритмы такие как развернутый алгоритм min-sum (EMS), алгоритм Min-Max и ите-

Башкиров Алексей Викторович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8-952-543-99-88, e-mail: kipr@vorstu.ru
Дьячков Юрий Владимирович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8-951-555-30-50, e-mail: kipr@vorstu.ru
Хорошайлова Марина Владимировна – ВГТУ, аспирант, тел. 8-920-415-15-65, e-mail: pmv2205@mail.ru

рациональные алгоритмы декодирования мягкой (жесткой) надежности на основе мажоритарной логики (ISRB-MLG (HRB-MLG)). Среди этих алгоритмов, алгоритм EMS и алгоритм Min-Max имеют одинаковую производительность BER, но алгоритм Min-Max имеет меньшую сложность. Алгоритм ISRB-MLGD (IHRB-MLGD) значительно упрощает обработку проверочного узла, так что эффективен для реализации СБИС. Тем не менее, алгоритмы ISRB-MLGD и IHRB-MLGD страдают от потери производительности BER. Поэтому, принимая во внимание производительность коррекции ошибок и сложность декодирования, алгоритм Min-Max является лучшим выбором для реализации графического процессора. Кроме того, мы можем легко расширить вычислительные ядра Min-Max для поддержки других алгоритмов, таких как алгоритм EMS, поэтому декодер также имеет большую гибкость.

Алгоритм декодирования Min-Max. Обозначим $L_n(a)$ и $\tilde{L}_n(a)$ как априорную и апостериорную информацию переменного узла n относительно символа a в $GF(q)$, соответственно. Пусть $R_{m,n}(a)$ и $Q_{m,n}(a)$ обозначим сообщение проверочного узла и сообщение переменного узла через символ a . Предположим, что x_n – n -й символ в принятом кодовом слове и s_n является наиболее вероятным символом для x_n . Min-Max алгоритм описан в алгоритме 1.

Алгоритм 1: Алгоритм декодирования Min-Max

Инициализация:

$$L_n(a) = \ln(\Pr(c_n = s_n | \text{канал}) / \Pr(c_n = a | \text{канал}));$$

$$Q_{m,n}(a) = L_n(a);$$

Итерации:

Вычисление проверочного узла

$$R_{m,n}(a) = \min_{(a_n)_{n \in N(m)} \in A(a)} \left(\max_{n' \in N(m) \setminus \{n\}} Q_{m,n'}(a_{n'}) \right);$$

$$\Lambda(a) \equiv \left\{ a_n \mid h_{mn} a + \sum_{n' \in N(m) \setminus \{n\}} h_{mn'} a_{n'} = 0 \right\};$$

Вычисление переменного узла

$$Q'_{m,n}(a) = L_n(a) + \sum_{m' \in M(n) \setminus \{m\}} R_{m',n}(a);$$

$$Q''_{mn} = \min_{a \in GF(q)} Q'_{m,n}(a);$$

$$Q_{m,n}(a) = Q''_{mn}(a) - Q'_{m,n}(a);$$

Предварительное декодирование:

$$\tilde{L}_n(a) = L_n(a) + \sum_{m \in M(n)} R_{m,n}(a);$$

$$c_n = \arg \min_{a \in GF(q)} \left(\tilde{L}_n(a) \right);$$

Если проверочное уравнение выполнено или число итераций достигнуто максимума, прекратить декодирование; В противном случае, вернуться к итерации.

Обработка проверочного узла содержит большую часть вычислений алгоритма Min-Max, который

имеет сложность $O(d_c \cdot q^2)$ для каждого проверочного узла. Как показано на рис.1 $L_n(a)$ и $\tilde{L}_n(a)$ могут быть представлены в виде 2-D $a \times n$ массива; $R_{m,n}(a)$ и $Q_{m,n}(a)$ могут быть представлены в виде 3-D $a \times n \times m$ массива. Благодаря специальной 2-D и 3-D структуре, способ организовать эти массивы в память существенно влияет на производительность.

Модель программирования OpenCL. Цель данной работы заключается в реализации высокопараллельного и гибкого декодера, который поддерживает различные типы кодов, различные длины кода и может работать на различных устройствах, таких как процессоры и графические процессоры. Поэтому выбрана модель программирования Open Compute Language (OpenCL) для осуществления параллельного недвоичные LDPC декодера. Модель OpenCL широко используется для программирования гетерогенных платформ, состоящих из центральных процессоров, графических процессоров и других устройств. Для массивной параллельной программы, разработанной для графического процессора, обработки параллельных данных эксплуатируется с OpenCL, выполнив в параллельных потоках. Модель OpenCL использует модель программирования Single Instruction Multiple Threads (SIMT). Если задача выполняется несколько раз независимо друг от друга над различными данными, которые могут быть отображены в ядро, и выполняются параллельно на многих сообщениях.

Исполнение ядра на графическом процессоре распределяется по сетке рабочих групп с регулируемыми размерами. Число рабочих элементов в рабочей группе должно быть запрограммировано в соответствии с числом доступных регистров на графическом процессоре для того, чтобы гарантировать достаточное количество регистров и местные памяти распределены каждому потоку во время компиляции. Все рабочие элементы внутри одной рабочей группы могут обмениваться данными через общий локальный механизм памяти. Синхронизации через рабочие элементы в рабочей группе необходимы, чтобы гарантировать правильность параллельного доступа к совместно используемой локальной памяти.

Параллельная реализация недвоичного LDPC-декодера.

A. Сложность анализа недвоичного LDPC декодирования. Учитывая свойства алгоритма, графический процессор на основе гетерогенной платформы очень подходит для реализации недвоичных LDPC алгоритмов декодирования. Для декодирования двоичного кода LDPC, более сотни кодовых слов, как правило, декодируются одновременно в полной мере использовать вычислительные ресурсы графический процессор, чтобы подтолкнуть предел декодирования пропускной способности. Тем не менее, мульти декодирования кодового слова страдает длительным латентным, которые препятствуют реализации графический процессор от

приложений реального времени. Распространяется и на более высокие GF(q) поля, вычисление ядра недвоичных LDPC кодов становятся более сложным по сравнению с теми в двоичном случае ($O(d_c \cdot q^2)$ против $O(d_c)$ для вычисления проверочного узла; предположим, d_c число ненулевых элементов, соединенных с проверочным узлом в матрице H). Min-Max ядра способны более обеспечить достаточное количество вычислений, чтобы сохранить все занятые вычислительные блоки. Кроме того, недвоичный алгоритм декодирования LDPC имеет более высокий коэффициент вычисления доступа к памяти. Чем выше это соотношение, тем меньше времени накладных расходов тратится на передачу данных. Эти особенности делают недвоичный алгоритм LDPC декодирования хорошим кандидатом на реализацию графического процессора.

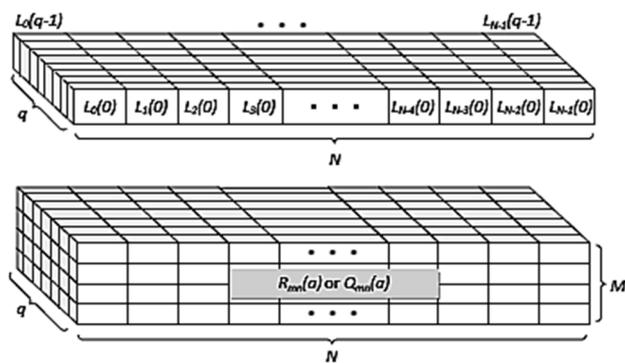


Рис. 1. Структура данных $L_n(a)$, $\tilde{L}_n(a)$, $R_{m,n}(a)$ и $Q_{m,n}(a)$

Время выполнения алгоритма Min-max на центральном процессоре

| Название блока | Время | Процентное соотношение |
|-------------------------------|------------|------------------------|
| LLR | 0,353 мс | 0,08% |
| CNP | 431,336 мс | 91,64 % |
| VNP | 30,462 мс | 6,43 % |
| Предварительное декодирование | 0,876 мс | 1,86 % |

Измерения времени работы основных блоков в Min-Max алгоритме проводились при запуске серийного справочного C код на центральном процессоре. Профилирования результатов в таблице показывают, что средства обработки проверочного узла (CNP) и обработки переменного узла (VNP),

занимают большую часть времени обработки (91,64% и 6,43%, соответственно).

Б. Представление алгоритма на параллельной архитектуре. Благодаря тщательному анализу алгоритма декодирования Min-Max, представляем работу потока итерационного процесса декодирования, как показано на рис. 2, включая CPU-GPU задачи секционирования, операции запуска ядра и передачи памяти. Основная программа запущена на хост-процессоре, который обрабатывает инициализации контекста OpenCL, планирование ядра и синхронизацию, управление итерациями декодирования, управления памятью и так далее. Для уменьшения передачи накладных расходов памяти между центральным процессором и GPU, помещаем большую часть вычислений на GPU и сохраняем все промежуточные сообщения в памяти устройства. Таким образом, нужно только две передачи памяти: одна для передачи принимаемых данных символа в ОЗУ устройства GPU в начале, а другая, чтобы получить декодированные символы обратно в конце процесса декодирования.

Стоит отметить, что предлагаемая работа поток представляет собой общую архитектуру, которая может быть использована для реализации различных недвоичных LDPC алгоритмов декодирования, в том числе алгоритма Min-Max. Только необходимы некоторые небольшие изменения в ядре CNP для поддержки других алгоритмов.

В качестве примера, на рис. 3 показана информацию о отображении CNP и VNP ядер на GPU параллельной архитектурой. Поскольку все сообщения являются векторами в недвоичном поле, можем порождать q рабочие элементы за рабочую группу, чтобы вычислить каждое сообщение CNP или VNP, так что эти q рабочие элементы могут иметь точно такой же путь вычисления и доступ к памяти шаблона. Это может помочь компилятору объединить операции для рабочих элементов в инструкции SIMT, чтобы воспользоваться GPU параллельной архитектурой.

Для дальнейшего повышения параллельности в рабочей группе в полной мере используется блок вычислений, можно сохранить общее число рабочих элементов без изменений, но назначить рабочие группы по-другому. Например, чтобы запустить ядро CNP, до сих пор появляться $M \times q$ элементов в работе в общей сложности. Но можно назначить $C \cdot Q$ рабочие элементы для каждой рабочей группы и использовать $[M / C]$ рабочие группы (предположим, что C выбрано целым числом).

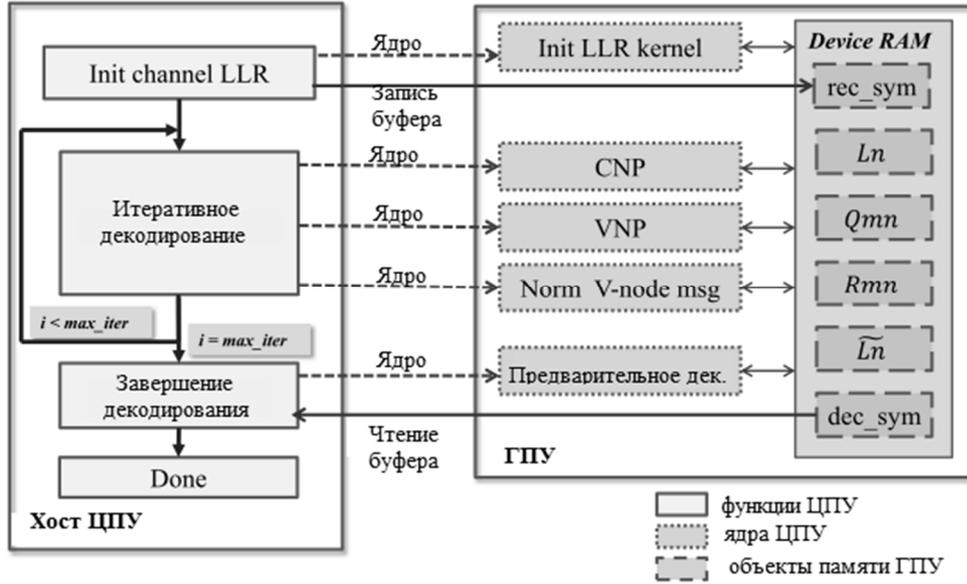


Рис. 2. Ядро разделения и поток программы

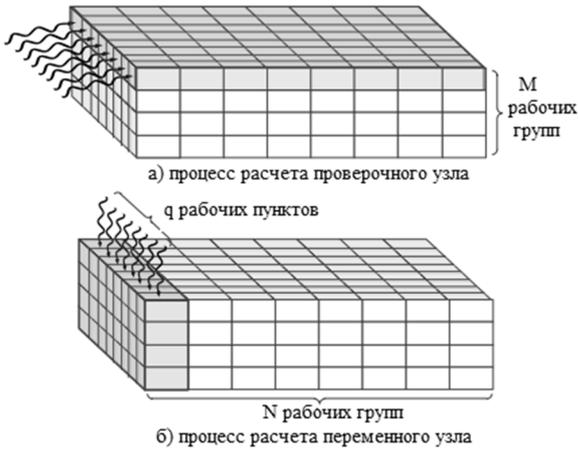


Рис. 3. Отображение CNP и VNP для OpenCL ядер.

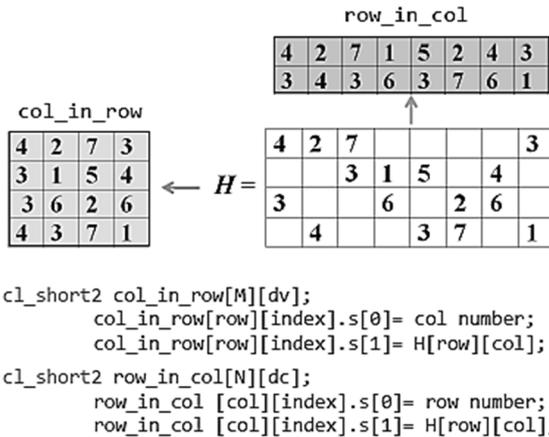


Рис. 4. Эффективное представление матрицы H

В. Эффективные структуры данных. Так как матрица H кода LDPC редкая, можно уменьшить потребность хранения и обеспечения быстрого доступа к памяти с помощью сжатых представлений, показанных на рисунке 4. Метод го-

ризонтального и вертикального сжатия матрицы H генерирует очень эффективные структуры данных. Используя тип данных вектора в OpenCL, как показано на рисунке, можно еще больше повысить эффективность сжатых представлений. Так как $R_{mn}(a)$ и $Q_{mn}(a)$ сообщения также имеют разреженные структуры, они также могут быть сжаты аналогичным образом.

Г. Ускоренный алгоритм вперед-назад в CNP. Оригинальный Min-Max алгоритм имеет сложность $O(q^{d_c})$ при обработке проверочного узла (CNP). Как показано в алгоритме 2, алгоритм вперед-назад (FBA) способен уменьшить сложность $O(d_c \cdot q^2)$. Пусть $N(m) = \{n_0, n_1, \dots, n_{(d_c-1)}\}$ множество переменных узлов, подключенных к проверочному узлу m.

Алгоритм 2: Алгоритм вперед-назад (FBA)

Для проверочного узла m, вычисляются передние метрики

$$F_0(a) = Q_{m,n_0}(h_{m,n_0}^{-1} a);$$

$$F_i(a) = \min_{a'+h_{m,n_i}a=a} (\max(F_{i-1}(a'), Q_{m,n_i}(a'')));$$

Вычисляются задние метрики

$$B_{(d_c-1)}(a) = Q_{m,n_{(d_c-1)}}(h_{m,n_{(d_c-1)}}^{-1} a);$$

$$B_i(a) = \min_{a'+h_{m,n_i}a=a} (\max(B_{i+1}(a'), Q_{m,n_i}(a'')));$$

Сообщение, вычисленное проверочным узлом

$$R_{m,n_0}(a) = B_1(h_{m,n_0} a);$$

$$R_{m,n_{(d_c-1)}}(a) = F_{(d_c-2)}(h_{m,n_{(d_c-1)}} a);$$

$$R_{m,n_i}(a) = \min_{a'+h_{m,n_i}a=a} (\max(F_{i-1}(h_{m,n_{i-1}} a'), B_{i+1}(h_{m,n_{i+1}} a''))).$$

Рис. 5 (а) показывает, как алгоритм вперед-назад переходит к реализации OpenCL. Расчеты

показаны для одного проверочного узла. Все элементы q работают в рабочей группе по-прежнему следуют по тому же пути исполнения, что является очень эффективным для реализации ГПУ. На рис. 5 (б) показаны детали решетчатой структуры передних вычислительных шагов. Прямые сообщения $F_i(a)$ (для $i=0,1,\dots,d_c-1$) на этапе i всегда нужно читать $F_{i-1}(a)$ сообщения от стадии $i-1$ после их перемежения. Эта операция вызывает перемежение, значительное снижение производительности из-за конфликтов доступа в глобальной памяти.

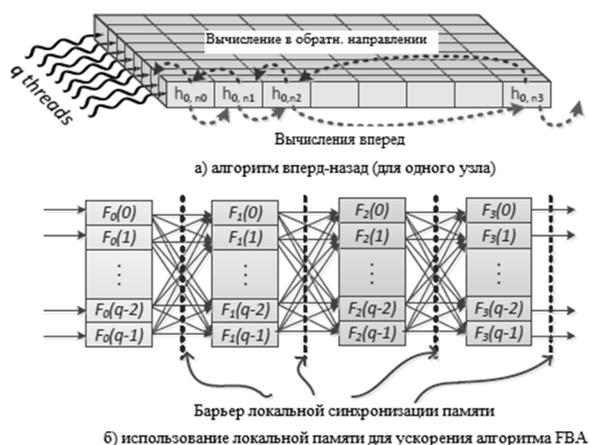


Рис. 5. Алгоритм вперед-назад и ГПУ реализация

Результаты экспериментов. Предложенная архитектура была реализована с использованием OpenCL. Эта реализация является гибкой и может быть легко настроена путем корректировки параметров для поддержки различных типов кода, длины кодов, а также различных устройств, таких как процессоры и графические процессоры. Реализация оценивается на двух процессорных платформах: двухъядерный процессор Intel i7-640LM работает на 2,93 ГГц и четырёхъядерный процессор AMD Phenom II X4-940 работает на 2,9 ГГц. Также проведены эксперименты на ГПУ NVIDIA GTX470 с 448 потоковыми процессорами, работает на 1,215 ГГц и с 1280MB памяти устройства GDDR5. Соответ-

Воронежский государственный технический университет

PARALLEL NON-BINARY LDPC-DECODING ON THE GRAPHICS PROCESSOR

A.V. Bashkirov, Ph.D., assistant professor of design and manufacture of radio, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kivr@vorstu.ru

Yu.V. Diachkov, Ph.D., assistant professor of design and manufacture of radio, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kivr@vorstu.ru

M.V. Horoshaylova, postgraduate of design and manufacture of radio, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, pmv2205@mail.ru

In this paper we propose a massively parallel implementation of the non-binary LDPC decoder based on the graphical processor (GPU) to achieve greater flexibility and scalability. Implementation displays algo-rhythm Min-Max decoding GPU parallel architecture. It describes the methodology of separating the decoding task on a heterogeneous platform consist-

ствующий OpenCL SDK устанавливается для каждой платформы. Использованы 1 / 2 (620; 310) (3; 6) - регулярный GF(32) код LDPC, который широко используется в проведении соответствующих исследований и показывает хорошие результаты коррекции ошибок. OpenCL события и функции, такие как clFinish (), clWaitForEvents () и clGetEventProfilingInfo () используются для измерения времени выполнения.

Заключение. Эта статья представляет собой исследование и описание новой параллельной реализации недвоичного LDPC декодера на ГПУ. По своей сути, массовый параллелизм недвоичного LDPC-декодера является более подходящим для реализации графического процессора, чем для двоичных кодов LDPC. Представленный метод в полной мере использует графические процессоры вычислительной мощности для ускорения недвоичных алгоритмов LDPC декодирования. Экспериментальные результаты показывают, что предложенный недвоичный LDPC декодер на основе реализации ГПУ может достичь большой производительности, гибкости и масштабируемости.

Литература

1. R. Gallager, «Low-density parity-check codes,» IRE Transactions on Information Theory, vol. 8, no. 1, 1962.
2. J. Lin, J. Sha, Z. Wang, and L. Li, «Efficient decoder design for nonbinary quasicyclic LDPC codes,» IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol. 57, no. 5, pp. 1071–1082, May 2010.
3. Башкиров, А.В. Модель масштабируемого LDPC-декодера низкой мощности с использованием алгоритмического синтеза высокого уровня [Текст] / А.В. Башкиров, Л.Н. Коротков, М.В. Хорошайлова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2016. – Т. 12. - № 1. – С. 65-69.
4. Башкиров, А.В. Реализация LDPC-декодера на массивно-параллельных вычислительных устройствах [Текст] / А.В. Башкиров, А.Ю. Савинков, М.В. Хорошайлова // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2015. - Т. 11. - № 6.– С. 97-99.

ing of a CPU and graphically graphics processor. Experimental results show that the decoder implementation based graphics processor achieves high throughput while providing more flexibility and scalability. The proposed architecture was implemented using OpenCL. This implementation is flexible and can be easily adjusted by adjusting the parameters to support different types of code, code length. Used half (620; 310) (3; 6) - regular GF (32) LDPC code, which is widely used in related research, and shows good performance error correction. Pre-representation method takes full advantage of graphics processors to speed up the processing power of non-binary LDPC decoding algorithms. The experimental results show that the proposition-adjoint non-binary low-density decoder based on the implementation of the graphics processor ustroystvo can achieve high performance, flexibility and scalability.

Key words: non-binary LDPC decoder decoding algorithm Min-Max, parallel architecture

References

1. Gallager R. Low-density parity-check codes,» IRE Transactions on Information Theory, vol. 8, no. 1, 1962.
2. Lin J., Sha J., Wang Z., Li L. Efficient decoder design for nonbinary quasicyclic LDPC codes, IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, , May 2010.
3. Bashkirov A. V. Model mashtabiruemogo LDPC – decoder nizkoy mochnosti s ispolzovaniem algoritmicheskogo sinteza vusokogo yrovnj [Model Low power LDPC-scalable decoder using the high-level algorithmic synthesis] Voronezh, VSTU 2016. 65-69 pp.
4. Bashkirov A. V. Realizachij LDPC – decoder na massivno-parallelnix vichislitelnix ystroystvah [Implementation of the LDPC-decoder on the massively parallel computing devices] Voronezh, VSTU 2015. 97-99 pp.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ БЛИЖНЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ МОДЕЛИ

В.В. Глотов, М.А. Ромащенко

На современном этапе проблема электромагнитной совместимости играет значимую роль в развитии радиоэлектронной аппаратуры. Большинство разработчиков стараются миниатюризировать электронные компоненты, из-за чего увеличиваются шансы сбоев в работе электронных средств. Для экономии фонда рабочего времени и денежных средств, вполне логично и целесообразно выявлять проблемные места печатной платы на ранних стадиях разработки. Так в статье представлено описание разработанной методики обнаружения ближнего электромагнитного поля, которая позволяет без проведения высокочастотных испытаний определять излучаемые помехи печатной платы в ближнем поле. Основой метода является – заменять источники излучений печатной платы множеством эквивалентных источников, диполей. Описывается процедура упрощения диполей в матрице, которая включает такие операции как «удаление» и «объединение»

Ключевые слова: ближнее поле, диполь, эквивалентная модель

Задача обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) в различных электронных средствах (ЭС) возникла как следствие научно-технического прогресса в радиотехнике по причинам непрерывного возрастания общего числа ЭС и как следствие повсеместного проникновения во все сферы деятельности человека. Целесообразно проводить тестирование на ранних стадиях проектирования печатных плат (ПП) [1]. Существует несколько методик определения источников излучения ПП.

Одной из таких методик является метод эквивалентной модели. Цель метода состоит в том, чтобы заменить источники излучений ПП множеством эквивалентных источников, которые должны генерировать значения полей в лучшем варианте с ПП. Учитывая тот факт, что электромагнитные излучения от ПП, как правило, производятся токами основных компонентов бесконечно малых диполей, используемых для эквивалентных источников, так бесконечно малая величина диполь представляет излучения от элементарного тока. Кроме того, диполь является простейшим излучателем, который может быть включен в любой электромагнитный компонент, таким образом, метод сохраняет вычислительные затраты на низком уровне.

Для визуализации на рисунке 1 показана модель ПП без определенного знания о структуре и информации о схеме, за исключением ее общих геометрических размеров. ПП сегментирована с

прямоугольной сеткой и каждый сегмент заменяется произвольно ориентированным эквивалентным диполем.

Таким образом, эквивалентные диполи находятся в массиве матрицы. Поскольку большинство ПП являются относительно тонкими, эквивалентные точечные диполи могут быть размещены в плоской поверхности в непосредственной близости от ПП.

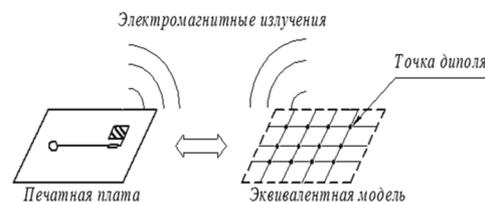


Рис. 1. Основной принцип эквивалентной модели диполя

Теоретически электрические или магнитные диполи или комбинации обоих, могут быть использованы в качестве эквивалентных источников ПП. Эквивалентные магнитные диполи и электрические диполи основаны на эквивалентном представлении бортовых токов, соответственно магнитными и электрическими токами.

Для упрощения задачи по определению момента и ориентации диполя каждую точку диполя разлагаем на три компонента M^x , M^y и M^z . После чего задача становится линейной. Исходя из принципа эквивалентности, эквивалентные диполи должны излучать такое же поле, как реальная ПП. Таким образом, момент (амплитуда и фаза) и ориентация диполей определяются путем подгонки измеренного тангенциального распределения магнитного поля в ближней зоне плоскости из

Глотов Вадим Валерьевич – ВГТУ, аспирант,
e-mail: vadik-livny@mail.ru

Ромащенко Михаил Александрович - ВГТУ, д-р техн.
наук, доцент, e-mail: kopr@vorstu.ru

решения обратной задачи. В декартовой системе координат магнитное поле H_x , H_y и H_z при (x, y, z) излучаемое бесконечно малым диполем M^z может быть выражено в точках x_0 , y_0 , z_0 . В выражениях (1-3) показано разложение компоненты M^z в качестве примера:

$$H_x = M^z \frac{jk e^{-jkr}}{4\pi r^4} (x - x_0)(z - z_0)(jkr + 3 + \frac{3}{jkr})$$

$$= M^z \xi_x^z, \quad (1)$$

$$H_y = M^z \frac{jk e^{-jkr}}{4\pi r^4} (y - y_0)(z - z_0)(jkr + 3 + \frac{3}{jkr})$$

$$= M^z \xi_y^z, \quad (2)$$

$$H_z = M^z \frac{jk^2 e^{-jkr}}{4\pi r} \left[\frac{(z - z_0)}{r^2} \left(j + \frac{3}{kr} + \frac{3}{jk^2 r^2} \right) - \left(j + \frac{1}{kr} + \frac{1}{jk^2 r^2} \right) \right] = M^z \xi_z^z. \quad (3)$$

где k - волновое число, r - расстояние от диполя до точки измерения по формуле:

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \quad (4)$$

Две другие составляющие M^x и M^y имеют аналогичные выражения с простым преобразованием координат [2]. На рис. 2 показана конфигурация идентификации эквивалентного источника из сканирования в ближней зоне.

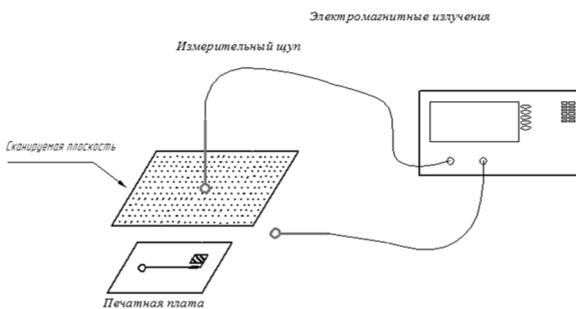


Рис. 2. Эквивалентная идентификация источника из ближнего поля сканирования

Амплитуда и фаза тангенциального магнитного ближнего поля H_x и H_y над плоскостью над ПП измеряются дискретно в точках $p \times q$ выборки. Поле в каждой точке измерения является суммарным вкладом всех эквивалентных диполей. Предположим, что существует m точек выборки измерений и n

дипольных компонентов измеренного тангенциально магнитного поля в плоском массиве дискретных точек, таким образом, связанных с массивом исходных магнитных диполей линейным уравнением матрицы:

$$\begin{bmatrix} \xi_x^x & \xi_x^y & \xi_x^z \\ \xi_y^x & \xi_y^y & \xi_y^z \end{bmatrix}_{m \times n} \begin{bmatrix} M^x \\ M^y \\ M^z \end{bmatrix}_{n \times 1} = [H_x]_{m \times 1} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \xi_x^x & \xi_x^y & \xi_x^z \\ \xi_y^x & \xi_y^y & \xi_y^z \end{bmatrix}_{m \times n} \begin{bmatrix} M^x \\ M^y \\ M^z \end{bmatrix}_{n \times 1} = [H_y]_{m \times 1} \quad (6)$$

где верхние индексы относятся к дипольным компонентам, а нижний индекс к измеренным компонентам поля.

В разложениях (5-6) коэффициенты ξ_x и ξ_y , как определено в формулах (1-3), зависят от позиции и частоты, таким образом, момент каждого диполя можно найти путем решения обратной задачи линейных уравнений в частотной области. Для того, чтобы получить единственное решение для M , общее число диполей не должно превышать общее количество измеренных точек поля ($n \leq m$). С помощью точного измерения ближнего поля, эквивалентные источники диполей полностью характеризуют свойства излучения ПП для полупространства, где берутся измерения ближнего поля.

Определение общего числа диполей для эквивалентной модели (например, разрешение дипольного массива матрицы), зависит от размера и сложности ПП. Большое число эквивалентных диполей приводит к более высокой точности, но и требует больших вычислительных ресурсов. На рис. 3 показан график тестовой ПП на частоте 1 ГГц, где σ_{MSE} и моделирование процессорного времени с различными разрешениями массива. При этом, полевые данные, используемые для построения эквивалентной модели, были получены из численного решения полного поля в методе моментов (МоМ) [4].

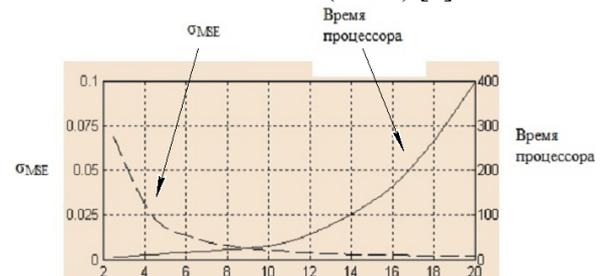


Рис. 3. Точность и расчетное время в зависимости от разрешения массива матрицы

Можно увидеть, что ниже критического значения (в данном случае около 10 мм), модель способна достичь хорошей точности, но вычислительные затраты постепенно увеличиваются. Сведение к минимуму числа диполей значительно облегчит последующее моделирование. Массив матрицы прост в модели, но может содержать некоторые избыточные диполи. Момент каждого диполя в матрице вычисляется. Затем осуществляется процедура упрощения, которая включает в себя «удаление» и «объединение», как показано на рис. 4. Удаление применяется, если абсолютное значение момента диполя очень мало. Убирающий фактор S_{gem} определяется в процентах. При соответствующим значении S_{gem} дипольный момент $< S_{gem}$ максимального, то дипольный момент может быть удален без создания существенной ошибки и его небольшой вклад в общее поле будет компенсирован другими диполями. Объединение применяется, если момент диполя очень похож на соседние диполи, поскольку вклад этих диполей в суммарном поле может быть аппроксимирован до одного диполя, помещенного в центре исходного кластера диполей. Комбинационный фактор определяется как S_{COM} в процентах. Таким образом, соседние диполи, в которых действительная и мнимая части моментов в пределах S_{COM} объединены. Наконец, после процедуры упрощения, моменты этих диполей в сокращенном массиве пересчитаны для построения окончательной модели [5].

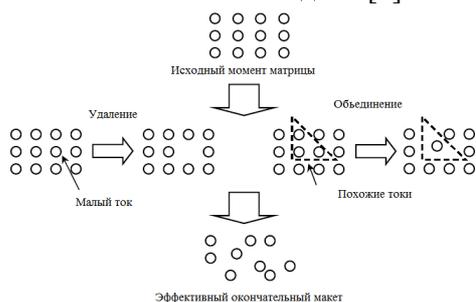


Рис. 4. Упрощение эквивалентного диполя массива

Увеличение факторов упрощения может постепенно уменьшить количество диполей, но слишком большое упрощение приводит к значительному увеличению погрешности. Кроме того, из рис. 5 (б) видно, что существует критическое значение факторов

упрощения, ниже которого σ_{MSE} почти постоянна. Поэтому, с учетом простоты и точности, выбор S_{gem} и S_{COM} вблизи критического значения является разумным, например, S_{gem} между 10 ~ 15% и S_{COM} между 10 ~ 20%. После упрощения, тем более эффективный массив обычно содержит приблизительно 70% от первоначального количества диполей.

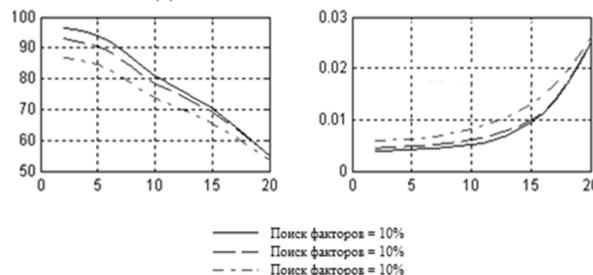


Рис. 5. Эффективность упрощения
а) влияние на количество диполей
б) воздействие на моделирование

Разработанная методика определения излучений ближнего электромагнитного поля позволяет без проведения высокзатратных испытаний определять излучения ближнего поля множеством эквивалентных источников, которые должны генерировать со значениями полей ПП.

Литература

1. Кечиев, Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры [Текст] / Л.Н. Кечиев. - М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 616 с.
2. Электронный каталог Лаборатория ЭМС. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.emc-problem.net>.
3. Макаров, О.Ю. Методы обеспечения внутриаппаратурной электромагнитной совместимости и помехоустойчивости в конструкциях электронных средств [Текст]: монография / О.Ю. Макаров, А.В. Муратов, М.А. Ромашенко. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013. – 234 с.
4. Ромашенко, М.А. Основные задачи анализа обеспечения ЭМС в конструкциях РЭС и принципы его выполнения [Текст] / М.А. Ромашенко // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7. - № 4. – С. 106-109.
5. Ромашенко, М. А Методы оптимального проектирования конструкций радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости и помехоустойчивости: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Ромашенко Михаил Александрович. - Воронеж, 2014. - 36с.

METHODS OF ASSESSMENT OF THE NEAR ELECTROMAGNETIC FIELD BY THE METHOD OF EQUIVALENT MODELS

V.V. Glotov, Postgraduate, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: vadik-livny@mail.ru

M.A. Romashchenko, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kipr@vorstu.ru

At present, the problem of electromagnetic compatibility plays an important role in the development of electronic equipment. Most developers are trying to miniaturize electronic components, due to which the increase in the chances of failures of electronic tools. To save production time and money, it is logical and appropriate to identify problem areas of the PCB in the early stages of development. Since the article is a description of the developed method of detection of near electromagnetic field, which allows without a high cost of tests to determine the noise emitted by the circuit board in the near field. The method is based – to replace sources of PCB emissions equivalent to a variety of sources, dipoles. Procedure described in simplification dipoles matrix which includes operations such as "delete" and "association."

Key words: near-field dipole equivalent mod

References

1. Kechiev L.N. Proektirovanie pechatnyh plat dlja cifrovoj bystrodejstvujushhej apparatury [Design of printed circuit boards for high-speed digital hardware]. Moscow, OOO "Grupa IMT", 2007. - 616 p.
2. OPAC EMC Laboratory. - Electron. Dan. - Access: <http://www.emc-problem.net>.
3. Makarov O.U., Muratov A.V., Romashchenko M.A. Metody obespechenija vnutriapparaturnoj jelektromagnitnoj sovmestivosti i pomehoustojchivosti v konstrukcijah jelektronnyh sredstv [Inside hardware ensure electromagnetic compatibility and noise immunity in the construction of electronic] Monograph – Voronezh, VPO "Voronezh State Technical University", 2013. - 234 p.
4. Romashchenko M.A. Osnovnye zadachi analiza obespechenija EMS v konstrukcijah RES i principy ego vypolnenija [Basic EMC software analysis tasks in designs REM and the principles of its implementation] Bulletin of Voronezh State Technical University. - 2011. - Volume 7, number 4. - S. 106-109.
5. Romashchenko M.A. Metody optimal'nogo proektirovanija konstrukcij radioelektronnyh sredstv s uchedom jelektromagnitnoj sovmestivosti i pomehoustojchivosti [Methods of optimal design constructions of radio electronic means with regard to electromagnetic compatibility and interference immunity] Abstract. Dis. ... Dr. tehn. Science / Romashchenko Mikhail. - Voronezh, 2014. - 36c.

ПОЛНОСТЬЮ ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ НЕДВОИЧНЫЙ LDPC-ДЕКОДЕР С ДИНАМИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧАСТОТЫ СТРОБИРОВАНИЯ

А.В. Башкиров, А.В. Муратов, М.В. Хорошайлова

В статье рассматривается 1,22 Гбит/с полностью параллельный декодер в GF(64) (160, 80) регулярного (2, 4) NB-LDPC кода в 90-нм КМОП. Построен на основе алгебраических свойств двоичных функций изображений с низкими степенями проверочных узлов (CN) и переменных узлов (VN), таким образом, сложность VN и CN может поддерживаться на низком уровне. 960 бит кодового слова сгруппированы в 160 6-битных GF (64) символов. Фактор-граф кода содержит 160 VNs и 80 CVs. Полностью параллельный декодер является прямым отображением фактор-графа. Реализовано динамическое изменение частоты стробирования на уровне узла, чтобы большинство узлов обработки были закрыты задолго до достижения предельного числа итераций. Пропускная способность дополнительно улучшена за счет конструкции одноступенчатого проверочного узла, который увеличивает тактовую частоту до 700 МГц, чередование операций переменного узла и проверочного узла укорачивает одну итерацию декодирования до 47 тактов. Когда все узлы обработки были стробированы, то декодер прекращает свою работу и переходит к следующему входу, чтобы увеличить пропускную способность до 1,22 Гбит/с

Ключевые слова: полностью параллельная архитектура, архитектура переменного узла, архитектура проверочного узла, недвоичный LDPC декод

Введение. Недвоичные LDPC (NB-LDPC) коды, определенные в поле Галуа, предлагают лучший коэффициент усиления кодирования и более низкий уровень ошибки, чем двоичные коды LDPC. Тем не менее, сложность декодирования и большое требование к объему и быстродействию памяти сделали невозможным реализацию такого декодера на кристалле. В статье рассматривается 1,22 Гбит/с полностью параллельный декодер в GF(64) (160, 80) регулярного (2, 4) NB-LDPC кода в 90-нм КМОП. Пониженное число ребер в кодах NB-LDPC графа позволили реализовать такой декодер на кристалле с полностью параллельной архитектурой.

Внедренные системы связи и хранения приняли сложные коды каналов для достижения более высокой надежности при передаче и хранении на самом низком отношении сигнал-шум (SNR). Для того чтобы ликвидировать разрыв в достижении конечной пропускной способности канала, известный как предел Шеннона, последними стандартами были приняты двоичный LDPC и турбо коды и были продемонстрированы многочисленные реализации архитектуры. Недвоичный LDPC (NB-LDPC) коды, определенные над полем Галуа, где $q > 2$, предложена лучшая эффективность кодирования, чем в двоичных кодах LDPC. Отличный выигрыш в кодировании NB-LDPC кодов может быть достигнут даже при короткой длине блока, и низкий уровень ошибки также был продемонстрирован.

Декодирование кодов NB-LDPC следует такой же алгоритм распространения доверия (BP), кото-

рый используется при декодировании двоичных кодов LDPC. Тем не менее, сложность декодера NB-LDPC значительно выше: каждое сообщение обменивается между узлами обработки в декодере NB-LDPC несет массив коэффициентов логарифма правдоподобия (LLR); обработка контроля по четности следует алгоритм вперед-назад; и операции GF высокого порядка требуют дорогостоящего согласования и сортировки, в отличие от гораздо более простого сложения и сравнить-выбрать используемый в двоичном LDPC декодирования.

Сложность декодера NB-LDPC и его способность исправлять ошибки определяется конструкцией кода. Квазициклические коды LDPC были изобретены, чтобы обеспечить хорошую производительность коррекции ошибок, а также их регулярные структуры поддаются эффективной архитектуре декодера. По сравнению с квазициклическими LDPC кодами, коды $(2, d_c)$ имеют очень низкую степень переменной узла $d_v=2$, и степень проверочного узла, также низко как $d_c=4$, уменьшая сложность обработки, соединение и потери квантования. Таким образом, $(2, d_c)$ коды являются привлекательными для практической реализации. Код $(2, d_c)$ NB-LDPC предлагает конкурентную производительность коррекции ошибок даже при короткой длине блока. Производительность может быть дополнительно улучшена за счет увеличения, порядка GF поля, но выше q увеличивает размер и сложность декодера.

Непосредственное осуществление декодирования BP для NB-LDPC кодов приводит к сложности проверочного узла $O(q^2)$ и сложности переменного узла $O(q)$. Реализация быстрого преобразования Фурье (FFT) уменьшает сложность проверочного узла $O(q \log q)$, но требует обработки проверочного узла в линейной области и преобразования между линейной и логарифмической записями сообщений домена. Расширенный min-sum (EMS) алгоритм в логарифмической области уменьшает

Башкиров Алексей Викторович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8-952-543-99-88, e-mail: kipr@vorstu.ru
Муратов Александр Васильевич – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8-905-652-04-03, e-mail: kipr@vorstu.ru
Хорошайлова Марина Владимировна – ВГТУ, аспирант, тел. 8-920-415-15-65, e-mail: pmv2205@mail.ru

сложность проверочного узла $O(qn_m)$ с использованием только небольшого подмножества n_m значений среди массива q LLR, в сообщении, где $n_m \ll q$. Дальнейшее упрощение алгоритма EMS обрезает младшие значения в сообщении и сохраняет только наиболее значимые значения в памяти. Обработка выполняется полностью с использованием усеченного сообщения, тем самым снижая сложность проверочного узла $O(n_m \log n_m)$ и сложность переменного узла $O(n_m)$. Укороченный алгоритм EMS показал минимальные потери в производительности коррекции ошибок при низком SNR по сравнению с BP, в то время как производительность превосходит BP при высоком SNR. Усеченный алгоритм EMS позволяет разработать декодер NB-LDPC с разумной сложности, который находится в пределах диапазона двоичных LDPC декодеров. Дальнейшее упрощение с использованием алгоритма Min-Max страдает от заметного ухудшения в коррекции ошибок производительности.

Код NB-LDPC, формируется путем группирования битов в символы с использованием элементов GF, пример которого показан на рис. 1. В примере, два бита сгруппированы в 2-битовый символ с использованием GF (4). В двоичной LDPC матрице H , изображенной на рис. 1, 2×2 субматрицы заменяются GF(4) элементами, в результате чего в поле GF(4) не двоичной H матрице. Регулярный (d_v, d_c) NB-LDPC код имеет постоянный вес столбца d_v и постоянный вес строки d_c . Код NB-LDPC, также может быть проиллюстрирована с использованием фактор-графа переменного узла (VN) и проверочного узла (CN). Ребро соединяет VN v_i и CN c_i , если соответствующая запись в H матрице $H(i,j) \neq 0$.

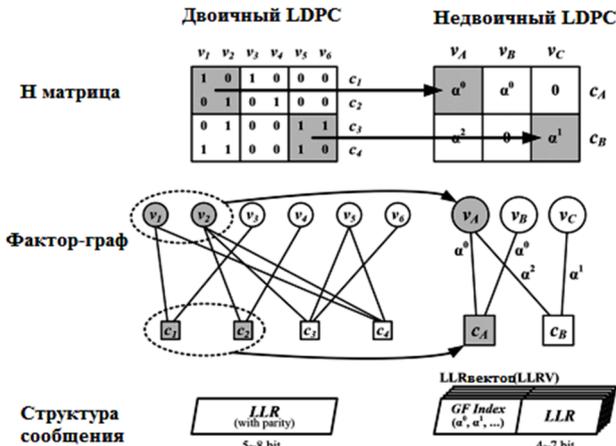


Рис. 1. Сравнение двоичного и недвоичного LDPC (NB-LDPC) кодов

А. Усеченный EMS алгоритм декодирования.

Код NB-LDPC декодируются итерационно передачей сообщений между VNs и CNs над фактор-графом. Сообщение VN к CN будет упоминаться как сообщение V2C, или $U_{j,i}$ (от v_j к c_i); и сообщение CN к VN, как сообщение C2V, или $V_{j,i}$ (от c_i к v_j).

1) VN Инициализация: декодирование начинается с инициализации каждого VN с известными

LLR, основываясь на информации, полученной от канал связи. Поскольку каждый VN в коде NB-LDPC представляет собой GF(q) элемент, предшествующий LLR для VN v_j , L_j является вектором LLR (LLRV) длины q , и каждый элемент LLRV соответствует элементу GF(q) α_k , $k \in \{1, \dots, q\}$

$$L_j = [L_j(1), L_j(2), \dots, L_j(q)]$$

$$\text{где } L_j(k) = \log \frac{P(v_j = \hat{\alpha} | y)}{P(v_j = \alpha_k | y)}$$

$$\text{и } \hat{\alpha} = \left\{ \arg \max_{\alpha_k \in GF(q)} P(v_j = \alpha_k | y) \right\} \quad (1)$$

и y информация канала. $\hat{\alpha}$ является GF элементом с максимальной вероятностью. Исходя из этого определения, более низкое значение LLR указывает на более высокую вероятность. В дальнейшем предполагаем, что LLRV отсортирован в порядке возрастания, если не указано иное. Вектор индекс GF связан с каждым LLRV для отслеживания GF элементов, которые соответствуют записям в LLRV. В векторе индекс GF, каждый GF(q) элемент хранится в его $\log_2 q$ -разрядном двоичном представлении. Используя усеченный EMS алгоритм, только минимальные n_m записи $n_m < q$, в LLRV сохраняются. В первой итерации декодирования, предшествующий уровень LLRV используется в качестве сообщения V2C, т.е. $U_{j,i} = L_j$.

2) CN Операция: Каждый GF элемент α_k в GF индекс векторе V2C сообщения $U_{j,i}$ умножается $H(i,j)$ до того, как сообщение посылается в CN. α_k хранится в двоичном представлении и $H(i,j)$ известно, так GF(q) что умножение описывается таблицей q поиска. Это GF умножение называется перестановкой.

Предположим, что CN получает сообщения от d_c VNs, v_j , $j \in \{1, 2, \dots, d_c\}$ где d_c является степенью CN. CN вычисляет сообщения C2V для каждого VN с помощью алгоритма вперед-назад в три этапа: вперед, назад, и соединение, которые показаны на рис. 2. вперед и назад может осуществляться параллельно.

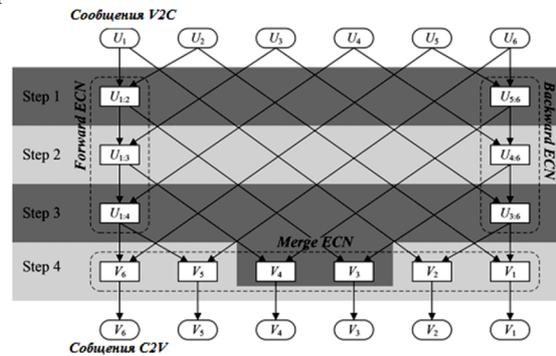


Рис. 2. Представления для алгоритма вперед-назад с $d_c=6$

Как видно из рис. 2, в шаге вперед, сообщение от v_1 совмещено с сообщением от v_2 , и сообщение объединения продолжается до достижения v_{dc-2} , следуя (2a). Операция «объединить» известна как

элементарный CN (ECN), который представлен \oplus в (2а). ECN принимает две длины- n_m входы LLRV, например U_1 и U_2 , и вычисляет длине- n_m LLRV вывода $U_{1,2}$, который содержит минимальные значения в наборе $\{U_1(i) + U_2(j), i \in [1, n_m], j \in [1, n_m]\}$. ECN производится с использованием вносимых сортировщиком длин n_m , а сложность ECN является $O(n_m^2)$. Шаг вперед требует d_c-3 в общей сложности ECNs.

$$\text{Вперед: } U_{1:j+1} = U_{1:j} \oplus U_{j+1}, \\ j = 1, \dots, d_c - 3 (U_{1:1} = U_1). \quad (2a)$$

$$\text{Назад: } U_{j-1:d_c} = U_{j:d_c} \oplus U_{j-1}, \\ j = d_c, \dots, 4 (U_{d_c:d_c} = U_{d_c}). \quad (2б)$$

$$\text{Соединение: } V_j = U_{1:j-1} \oplus U_{j+1:d_c}, \\ j = 2, \dots, d_c - 1. \quad (2в)$$

Шаг назад рассчитывается следующим образом (2б), и он совпадает с шагом вперед, за исключением того, что это будет сделано в обратном направлении, как показано на рис. 2. После того, как вперед и назад, являются полными, сообщения C2V можно легко рассчитать путем объединения сообщений, полученных от вперед и назад, как это описано (2в) и показано на рис. 2. Объединение требует d_c ECNs. Подводя итог, алгоритм вперед-назад для CN требует $3d_c-6$ ECs в общей сложности, и каждый ECN имеет сложность $O(n_m \sqrt{n_m})$.

Проблемы моделирования декодера. По сравнению с двоичным кодом LDPC, фактор-граф NB-LDPC кода является более компактным, с меньшим количеством узлов и гораздо меньшим количеством ребер, предлагая более простую проводку в реализации декодера. Тем не менее, груп-

пировка $\log_2 q$ двоичных разрядов в $GF(q)$ символ расширяет память сообщений от $\log_2 q$ слов к q словам. Усеченный EMS алгоритм уменьшает память сообщений для n_m ($n_m < q$) слов, например, $GF(64)$ NB-LDPC-код может быть декодирован с использованием $n_m=16$, требуя 16 слов в памяти сообщений, но все еще выше, чем то, что необходимо в двоичном LDPC декодере.

Операции VN и CN в NB-LDPC декодере, как описано выше, являются более сложными, чем для двоичного LDPC декодера. CN двоичного LDPC декодера выполняет сравнение выбор и исключение ИЛИ в распределяемой древовидной структуре сложности $O(d_c)$, таким образом, CN может быть легко распараллелен для высокой пропускной способности. CN из декодера NB-LDPC выполняет вперед, назад и слияние с сложности $O(d_c n_m \sqrt{n_m})$. с использованием усеченного алгоритма EMS с проверкой ECN. VN из NB-LDPC декодера также является более сложным, чем VN двоичного LDPC декодера, со сложностью $O(d_v n_m)$ в сравнении с $O(d_v)$. Для практической реализации NB-LDPC декодеров, операции CN и VN должны сериализовать, что приводит к снижению пропускной способности. Чем больше памяти, дорогие сортировщики и CAMs вносят свой больший вклад в Vns и CNs.

Высокая пропускная способность полностью параллельной архитектуры декодера. Декодер NB-LDPC тяжел на логику и память, но имеет меньшее число проводников по сравнению с двоичным LDPC декодером. Параллельная реализация NB-LDPC декодера не берет на себя те же проводники в реализации двоичного LDPC декодера. Полностью параллельная реализация также упрощает планирование управления и сообщения, что приводит к более эффективному дизайну.

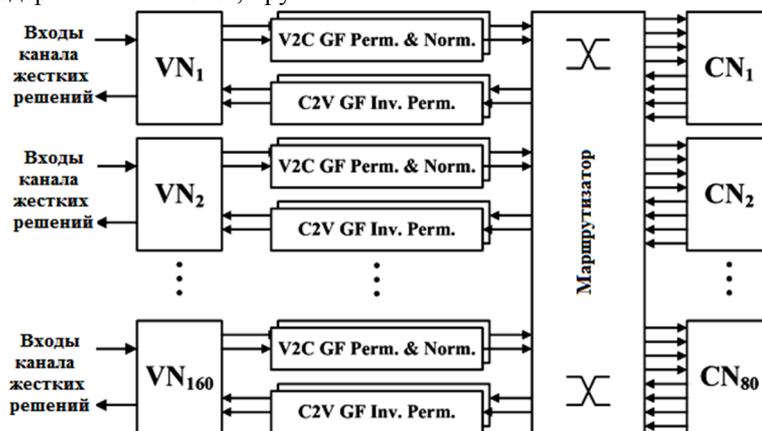


Рис. 3. Архитектура полного параллельного недвоичного LDPC декодера

$GF(64)$ (160, 80) регулярный (2, 4) NB-LDPC-код построен на основе алгебраических свойств двоичных функций изображений с низким VN и CN степенями, таким образом, сложность VN и CN может поддерживаться на низком уровне. Блок-схема полностью параллельного декодера показана

на рис. 3. 960 бит кодового слова сгруппированы в 160 6-битных $GF(64)$ символов. Фактор-граф кода содержит 160 VNs и 80 CVs. Полностью параллельный декодер является прямым отображением фактор-графа с 160 2 входами VNs и 80 4-вход CNs, как показано на рис. 3. Каждое ребро в фактор-

графе несет LLRV. Записи о LLRV посылаются последовательно, чтобы уменьшить разрядность проводников и в соответствии с конвейерной обработкой CN и VN. Перестановка и обратная перестановка помещаются между VNs и CNs, и сообщения нормированы на каждой итерации, чтобы предотвратить насыщение. Сообщения в этой конструкции квантуются до 5 битов, чтобы обеспечить хорошую производительность при сведении к минимуму хранения. Декодер реализует усеченный алгоритм EMS с $n_m=16$. Длина слова и усеченный EMS были широко промоделированы, чтобы обеспечить хорошую производительность коррекцию ошибок вплоть до очень низких уровней BER.

Архитектуры переменных и проверочных узлов.

А) Проверочные узлы. CN занимает 4 V2C сообщения, U_1, U_2, U_3, U_4 , и вычисляет 4 C2V сообщения, V_1, V_2, V_3, V_4 , с помощью алгоритма вперед-назад, показанного на рис. 2. принимает шаг

вперед U_1 и U_2 для вычисления $U_{1,2}$; и одновременно, принимает шаг назад U_4 и U_3 для вычисления $U_{3,4}$. Далее, четыре слияния выполняются параллельно для вычисления сообщений V2C, как это показано на рис. 4. Шаг вперед, шаг назад, и объединение – все сделано с помощью ECN.

ECN реализует алгоритм проверки для нахождения n_m минимальных значений в наборе $T_{\Sigma} = \{U_1(i) + U_2(i), i \in [1, n_m], j \in [1, n_m]\}$, где U_1 и U_2 два входа LLRVs. Набор T_{Σ} представлена в 2-мерной матрицей. Записи T_{Σ} вычисляются на лету, прочитав одну запись из $U_1(i)$ и одну из $U_2(j)$ и их суммирования. GF элемент, который соответствует сумме, вычисляется путем добавления элемента GF, связанного с $U_1(i)$ и элемента GF, связанного с $U_2(j)$.

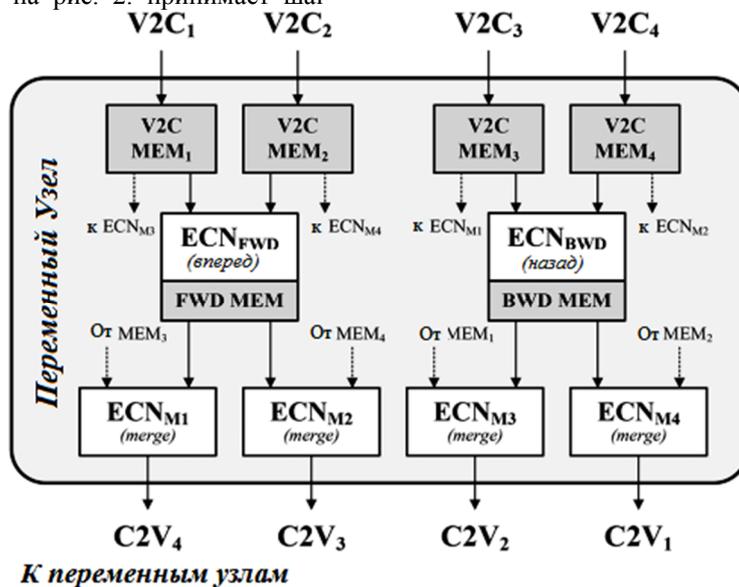


Рис. 4. Архитектура проверочного узла

Так как пара GF элементов сохраняются в двоичном представлении, добавление делается побитовой XOR пары. ECN использует вставки сортировщика длины 6 для $n_m=16$. ECN сортировщик инициализируется с $T_{\Sigma}(1,1), T_{\Sigma}(2,1), \dots, T_{\Sigma}(6,1)$. ECN сортировщик выдает минимальный вход, например $T_{\Sigma}(i_1, j_1)$, каждый шаг и новый элемент $T_{\Sigma}(i_n, j_n)$ вставляется. ECN будет завершена после n_m шагов.

В) Переменные узлы. VN занимает 2 C2V сообщения, V_1, V_2 , и до LLRV вычисляются 2 V2C сообщения, U_1, U_2 , и последующие LLRV. Низкая степень VN 2 упрощает реализацию. Три EVNs используются: EVN_1 и EVN_2 начинают в первой вычислять U_2 и U_1 последующим EVN_3 . Такая конструкция сокращает VN критический путь, как EVN_3 был исключен из критического пути.

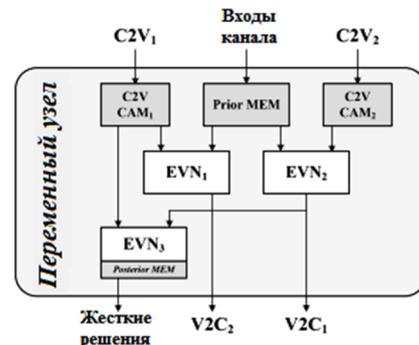


Рис. 5. Архитектура переменного узла

Динамическое изменение частоты стробирования. Архитектура стробирования показана на рис. 6. Детектор сходимости внутри каждого VN контролирует жесткие решения в каждой итерации, чтобы проверить, изменились ли жесткие решения между итерациями. Счетчик отслеживает количество последовательных итераций, что жесткие ре-

шения остаются неизменными. Когда критерий сходимости выполнен, детектор сходимости позволяет переключиться (CG защелку), чтобы отключить вход синхронизации для всех последователь-

ных схем, за исключением основных цепей управления, которые необходимы для восстановления от изменения состояния стробирования.

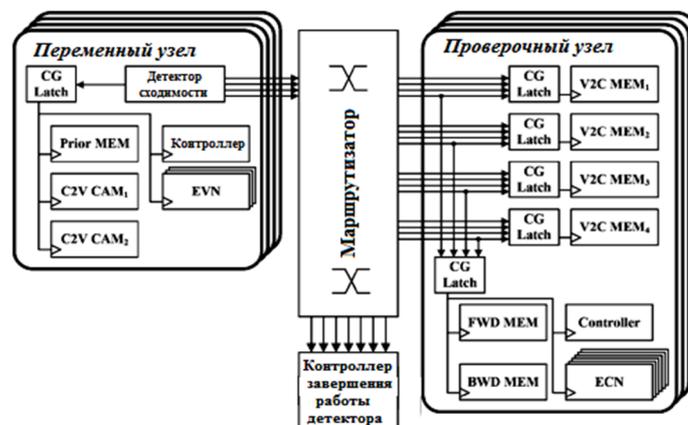


Рис. 6. Реализация динамического изменение частоты стробирования для переменного и проверочного узлов

Заключение. Представлен полностью параллельный NB-LDPC декодер низкими межсоединениями, которые присущи кодам NB-LDPC. Для дальнейшего повышения пропускной способности, был использован один уровень к элементарной конструкции CN для сокращения периода синхронизации и переключения операции CN и VN для короткой итерации задержки 47 циклов. Реализовано динамическое изменение частоты стробирования на уровне узла, чтобы большинство узлов обработки были закрыты задолго до достижения предела итераций. 7,04 мм 90 нм кристалл тест-декодер предназначен для GF(64) (160, 80) регулярного (2, 4) NB-LDPC-кода. Декодер реализует динамическое изменение частоты стробирования и прекращает для достижения высокой пропускной способности 1,22 Гбит/с на частоте 700 МГц, потребляя 3,03 ндж/б. Тестовый кристалл демонстрирует превосходную производительность с исправлением ошибок по сравнению с двоичным LDPC декодером. Напряжение и частота масштабирования тестового кристалла до 675 мВ и 400 МГц дальнейшего повышения энергетической эффективности до 89 пикоджоулей / В / итерации при пониженной пропускной способностью 698 Мбит / с.

Воронежский государственный технический университет

A FULLY PARALLEL NOBINARY LDPC DECODER WITH DYNAMIC CHANGE OF SAMPLING FREQUENCY

A.V. Bashkirov, Ph.D., assistant professor of design and manufacture of radio, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kivr@vorstu.ru

A.V. Muratov, doctor of technical sciences, professor, head of design and manufacture of radio, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kivr@vorstu.ru

M.V. Horoshaylova, postgraduate of design and manufacture of radio, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, pmv2205@mail.ru

Литература

1. X. Chen, C.-L. Wang, «High-throughput efficient non-binary LDPC decoder based on simplified min-sum algorithm» IEEE Trans. Circuits, Syst. I, Reg. Papers, vol. 59, no. 11, Nov. 2012
2. D. Declercq, M. Fossorier, «Decoding algorithms for nonbinary LDPC codes over GF(q)» IEEE Trans. Commun., vol. 55, no. 4 Apr. 2007.
3. Башкиров А.В. Оптимизация аппаратной архитектуры LDPC-декодера, применяемого в стандарте радиосвязи IEEE 802.11n [Текст] / А.В. Башкиров, А.Ю. Савинков, М.В. Хорошайлова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. - Т. 12. - № 1. – С. 97-99.
4. Башкиров, А.В. Реализация LDPC-декодера на массивно-параллельных вычислительных устройствах [Текст] / А.В. Башкиров, А.Ю. Савинков, М.В. Хорошайлова // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. – Т. 11. - № 6. – С. 97-99.
5. Башкиров, А.В. Краткий анализ корректирующей способности кодов Боуза-Чоудхури-Хоквингема [Текст] / А.В. Башкиров, Ю.В. Дьячков, А.В. Муратов, М.В. Хорошайлова // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций Материалы 18-й Международной научно-технической конференции. – М.: «Горячая линия-Телеком» 2015. – С. 42-44.

The article discusses the 1.22 Gbit / s in a fully parallel decoder GF (64) (160, 80), regular (2, 4) NB-LDPC code in the 90 nm CMOS. Is based on algebraic properties of the binary image functions with low degrees of check nodes (CN) and variable nodes (VN), thus, complexity and VN CN mo-Jette kept low. 960 bits of the codeword 160 are grouped into 6-bit GF (64) characters. Factor graph code comprises 160 VNs and 80 CVs. The fully parallel decoder is a direct mapping of the factor graph. Implemented a dynamic change in the frequency of sampling at the site level to the majority of the processing units have been closed long before reaching the limit number of iterations. Throughput is further improved by the design of a single-stage check node, which increases the clock frequency to 700 MHz, and the alternating variable node operations and CHECK-term node shortens one iteration of decoding up to 47 cycles. When all the processing units were strobe Rowan, the decoder stops working and moves to the next entry in order to increase the capacity up to 1.22 Gb / s

Key words: full parallel architecture, architecture the variable node, architecture the check node, non-binary LDPC decoder

References

1. Chen X., Wang C. L., High-throughput efficient non-binary LDPC decoder based on simplified min-sum algorithm IEEE Trans. Circuits, Syst. I, Reg. Papers, vol. 59, no. 11, Nov. 2012
2. Declercq D., Fossorier M., «Decoding algorithms for nonbinary LDPC codes over GF(q)» IEEE Trans. Commun., vol. 55, no. 4 Apr. 2007.
3. Bashkirov A. V. Optimizachij apparatnoy arhitektri LDPC – decoder, primenjemogo v standarte radiosvjzi IEEE 802.11n [Optimization LDPC-decoder hardware architecture used in the IEEE 802.11n standard radio communication] Voronezh, VSTU 2016, 97-99 pp.
4. Bashkirov A. V. Model macshtabiruemogo LDPC – decoder nizkoy mochnosti s ispolzovaniem algoritmicheskogo sinteza vusokogo yrovnj [Model Low power LDPC-scalable decoder using the high-level algorithmic synthesis] Voronezh, VSTU 2016. 65-69 pp.
5. Bashkirov A. V. Realizachij LDPC – decoder na massivno-parallelnix vichislitelnix ystroystvah [Implementation of the LDPC-decoder on the massively parallel computing devices] Voronezh, VSTU 2015. 97-99 pp.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ТИПОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

С.Н. Григорьев, С.В. Сафонов, В.П. Смоленцев

Рассмотрены характерные примеры применения технологических приемов для достижения требуемых эксплуатационных характеристик базовых деталей, работающих в нагруженных узлах изделий при неблагоприятных условиях воздействия агрессивных сред, тепловых потоков, импульсных нагрузок. Приведены критериальные оценки полученных результатов от разработки и применения комбинированных методов модификации поверхностного слоя.

Проведенные в последние десятилетия исследования показали, что развитие проблемы идет в следующих основных направлениях:

- с модификацией свойств без удаления припуска с целенаправленным комбинированным воздействием на поверхностный слой. Это, прежде всего, тепловые, механические, химические процессы, электромагнитные воздействия, сочетание которых в единой комбинированной технологии позволяет придать деталям повышенные эксплуатационные характеристики. В процессе модификации могут формироваться нанопленки с толщиной, не оказывающей влияния на изменение размеров изделия;

- с удалением части поверхностного слоя изделия до достижения материала, обладающего требуемыми эксплуатационными свойствами;

- с наращиванием слоев из материалов с особыми свойствами с монолитной структурой, где эксплуатационные свойства обеспечиваются путем перенесения на деталь (в том числе из других видов материалов) требуемых характеристик (износостойкость, жаростойкость и др.) к изделию через параметры наносимого покрытия. Типовым представителем такой технологии является электроэрозионное легирование, которое в последние годы стало широко использоваться в виде технологии восстановления геометрии деталей с наращиванием слоев толщиной более 1 мм. Это дает основание утверждать, что такой процесс становится частью технологии прототипирования. Здесь достигается принципиально новый результат, устраняющий основной недостаток процесса прототипирования – нестабильность прочностных характеристик, т.к. при нанесении покрытия свойства базовой детали не нарушаются, а прочность слоя обеспечивается применением адаптивных комбинированных процессов, как правило, с наложением электрического поля;

- с нанесением слоев, включающих гранулы токопроводящих и диэлектрических материалов (например, керамики, абразива и др.). Это расширяет возможности разработчиков по созданию современной техники, что также актуально особенно для ведущих отраслей отечественного машиностроения: изделий авиационной, космической техники, ремонта транспортных средств и др.

Ключевые слова: комбинированные процессы, технология, формирование поверхностного слоя, модификация, эксплуатационные показатели

Введение

Анализ влияния многолетних исследований традиционных и новых технологических процессов на повышение эксплуатационных показателей деталей показывает, что требуется использовать не только имеющиеся методы обработки, но и целенаправленно комбинировать их в единый технологический процесс, учитывающий условия эксплуатации деталей в изделии [1, 2]. При модификации поверхностного слоя можно придать объектам нужное сочетание эксплуатационных свойств, которые неосуществимы при индивидуальных

технологических воздействиях, или такие процессы оказываются неэффективными. Примером таких воздействий является химическое и электрохимическое изменение слоя материала, обеспечивающее получение деталей с новыми свойствами, например, с использованием легкой основы из легких сплавов с твердым покрытием из чугуна, обладающего высокой твердостью и износоустойчивостью, в том числе при повышенных температурах эксплуатации. Количественные оценки эффективности предлагаемых технологических приемов приведены ниже для типовых операций изготовления наукоемких изделий.

Технологический процесс (ТП) модификации поверхностного слоя нанесением покрытий

Целью работы является получение детали с минимальной массой и высокими эксплуатационными свойствами по антифрикционным показателям и

Григорьев Сергей Николаевич – МГТУ (СТАНКИН), д-р техн. наук, профессор, тел. 8-499-972-94-00, e-mail: rector@stankin.ru

Сафонов Сергей Владимирович – ВГТУ, канд. пед. наук, профессор, тел. 8(473)246-29-90, e-mail: safonov@vorstu.ru

Смоленцев Владислав Павлович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8-903-655-99-70, e-mail: ysmolen@inbox.ru

износостойкости узлов терния (детали из валов привода (например, компрессора теплового двигателя).

Здесь имеет место комбинация тепловых и химических воздействий, сочетание которых формирует новый комбинированный процесс (патент 2405662 [3]), где достигается химическое удаление с поверхности алюминиевого сплава окисной пленки с одновременным нанесением электроэрозионным способом слоя чугуна.

Созданный на базе способа [3] комбинированный технологический процесс имеет следующие особенности: проектирование режимов нанесения и возобновления выбранных химически активных материалов, а также времени выдержки для удаления окисной пленки; адаптивное управление по времени нанесения чугунного покрытия по предельному периоду стабильного протекания процесса.

Для получения качественного покрытия предложены следующие характеристики обработки [4]:

- состав химически активного материала;
- время выдержки – 2-5 с (адаптивное управление);
- покрытие: чугун СЧ24;
- электрод: стержень из чугуна диаметром 1-1,5 мм;
- напряжение на электродах 50-60 В;
- скорость перемещения электрода 1-2 мм/с (адаптивное управление).

Достигнуты следующие результаты:

- толщина слоя качественного чугунного покрытия – до 1,4 мм на диаметр;
- сплошность покрытия – не менее 85%;
- неравномерность по толщине покрытия - $\pm 0,1$ мм;
- твердость покрытия HRB220 \pm 20;
- повышение износостойкости по сравнению с алюминиевым сплавом – до 10 раз.

Технологический процесс модификации поверхностного слоя с удалением припуска

Исследования выполнялись с целью снижения и удаления напряжений растяжения,

алюминиевого сплава с чугунным покрытием), а также формирования профиля детали путем снятия припуска.

В качестве примера объекта исследований на рис.1 показаны стяжные места ленты лопастей вертолетов тяжелого класса.

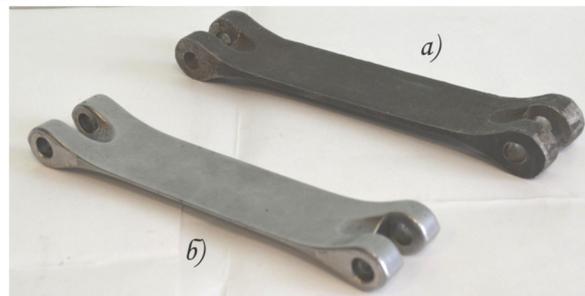


Рис. 1. Стяжные ленты: а) заготовка для электрохимической размерной обработки; б – деталь после обработки полотна

При комбинированной обработке используется следующее сочетание воздействий: магнитное, импульсное механическое и химическое. На базе этих воздействий по а.с. 745638 [5] спроектирован комбинированный процесс обработки со стабилизацией положения зоны анодного растворения и адаптацией силы для стабилизации ее положения.

При проектировании ТП создан механизм адаптации управления процессом по сигналу обратной связи от измененного межэлектродного зазора компенсацией силы технологического тока.

Применены следующие режимы обработки: напряжение 10-16 В; рабочая среда – 15% раствор хлористого натрия с температурой 18-24 °С. Дифференциальное изменение силы тока в импульсе не более 10%.

В результате достигнуто устранение остаточных напряжений растяжения; погрешность профиля $\pm 0,05$ мм; шероховатость поверхности $R_a=0,63-0,32$ мкм; повышение производительности до 18 раз. Результаты внедрены в производство.

Проведено обоснование выбора средств воздействий с оценкой их эффективности по критериям полезности (табл.1).

Таблица 1

Оценка полезности разработанных способов защиты от растворения технологической оснастки

| Объект обработки | Способ защиты поверхностного слоя | Коэффициенты полезности | | Ограничения |
|--|---|-------------------------|------------------------|---|
| | | $\overrightarrow{K_1}$ | $\overrightarrow{K_2}$ | |
| Оснастка для ЭХО сопловых лопаток авиационных двигателей | Термическая обработка на разработанных технологических режимах [4] | 1,2÷1,5 | 1,5÷2,0 | Удорожание оснастки $\overleftarrow{K_3} = 0,1÷0,15$ |
| Оснастка для ЭХО стальных лент | Преобразования в поверхностном слое под действием созданных режимных параметров [5] | 2,0÷3,0 | 10÷30 | Снижение коэффициента выхода по току $\overleftarrow{K_3} = 0,2÷0,3$ |

В табл. 1 $\overrightarrow{K_1} = \frac{\Pi_p}{\Pi_o}$; $\overrightarrow{K_2} = \frac{\Pi_o}{\Pi_o}$, где Π_o – ресурс оснастки без защиты поверхностного слоя; Π_p – ресурс с модификацией по предложенному способу; Π_o – ресурс после разработки перспективных методов защиты от растворения при электрохимической размерной обработке (ЭХО).

Технологический процесс модификации поверхностного слоя без изменений геометрии детали

Реализация процесса механического воздействия и воздействия электрохимического катодного положения поля на гранулы позволяет значительно повысить усталостную прочность изделий и получить малую шероховатость поверхности при минимальном измененном слое [7].

Исследования проводились на рабочих лопатках турбины современных авиационных двигателей (рис. 2).



Рис. 2. Рабочие лопатки турбины

Здесь имеет место следующее сочетание воздействий: импульсное механическое и химическое.

Технологический процесс спроектирован на базе способа по патенту 2333822 [6] комбинацией ударного воздействия токопроводящих гранул в жидкой среде с наложением электрического поля с параметрами, воздействующими только на микрогеометрию обрабатываемой поверхности.

Принятые режимы обработки:

- рабочая среда – промышленная вода;
- частота следования вибраций – 5 Гц;
- гранулы: металлические шарики диаметром 3; 5 мм в пропорции 1:1;
- адаптация частоты по поддержанию наибольшей силы соударения гранул с зоной упрочнения.

Получены эксплуатационные показатели:

- повышение усталостной прочности деталей до 15-20%;
- снижение шероховатости до $R_a = 0,32-0,63$ мкм;
- повышение производительности операций на 20-30%.

В табл. 2 приведена критериальная оценка от использования принципа полезности наиболее значимых эксплуатационных показателей.

Повышение защитных свойств поверхностного слоя турбинных лопаток

| Главный эксплуатационный показатель | Метод воздействия на поверхностный слой лопатки | Коэффициенты полезности | | Ограничения |
|---|---|-------------------------|-------------|------------------------------------|
| | | \vec{K}_1 | \vec{K}_2 | |
| Повышение жаростойкости | Специальное покрытие | 1,5÷2,0 | 2,0÷3,0 | Рабочая температура покрытия |
| Повышение усталостной прочности (ресурса) | Механическое упрочнение [4] | 1,1÷1,2 | 1,2÷1,3 | Накопленные микродефекты материала |

В табл. 2 коэффициенты полезности находились аналогично пояснениям, представленным в табл. 1.

Научным результатом этого этапа исследований является новый способ (подана заявка на патент).

Технологический процесс преобразования геометрии детали путем управления электрическим полем

Эффективность процесса оценивается уровнем технологичности электрода-инструмента, обеспечивающего получение заданной геометрии проточного тракта в форсунках и фильтрах ракетных двигателей.

На рис. 3 приведены типовые конструкции форсунок, в том числе при размещении на огневой доске (рис. 3, б).



а)



б)

Рис. 3. Форсунки: а – центробежная форсунка; б – фрагмент огневой доски с форсунками

Комбинированный процесс включает следующие воздействия: тепловое, химическое, магнитное.

Комбинированный метод является совмещением электроэрозионного и электрохимического способа с управлением полем через локальное перераспределение плотности тока на рабочей части электрода. Метод базируется на способах по патентам № 2538456 [7] и 2537409 [8].

ТП имеет следующие особенности: создан механизм адаптивного управления процессом съема припуска по сигналу обратной связи через силу тока

регулированием напряжения на электродах, что требует ограничения плотности тока по пределу возникновения коротких замыканий. Должны быть учтены ограничения по диаметру отверстий и глубине перемещения в детали электрода-инструмента для обеспечения заданного профиля отверстия в проточном тракте. Требуется обоснование противодействия при многоэлектродной обработке путем обратной связи через гравитационную составляющую регулирующего элемента электрода-инструмента.

Рабочие режимы обработки:

- напряжение 80-110 В;
- рабочая среда – деионизированная вода с малой проводимостью;
- продольные вибрации инструмента – 80-120 Гц;
- стабильность силы тока $\pm 5\%$;
- противодавление 0,01-0,02 МПа.

При изготовлении форсунок и фильтров получены следующие результаты:

- создание технологического инструмента с квадратными электродами в

количестве до 500 штук в блоке для выполнения фильтров с круглыми отверстиями с диаметром более 0,25 мм;

- изготовление форсунок с профилем проточной части в виде сопла Лаваля, что повысило скорость протекания рабочей среды и отодвинуло зону горения от форсунки, повысило ресурс и надежность форсунок.

Критериальная оценка основных эксплуатационных показателей по критерию полезности приведена в табл. 3.

Таблица 3

Повышение эксплуатационных характеристик форсунок путем снятия припуска или покрытия каналов подачи рабочих сред

| Главный эксплуатационный показатель | Технологические методы воздействия | Коэффициенты полезности | | Ограничения |
|---|---|-------------------------|-------------|---|
| | | \vec{K}_1 | \vec{K}_2 | |
| Расход рабочей среды через канал форсунки | Электрохимическое снятие припуска в отверстиях | 1,5÷2,0 | 2,0÷3,0 | Изменяется радиус кромки, что влияет на стабильность распыла Высокая трудоемкость изготовления инструмента |
| | Нанесение покрытия на поверхность канала | | 1,3÷2,0 | Нестабильность процесса формирования кромки, что приводит к необходимости повторной обработки |
| Распыл рабочей среды | Электрохимическое скругление кромки на выходе струи из канала | 1,2÷1,3 | | |

При оценке полезности по расходу учитывается отношение рассеивания расхода через обрабатываемое отверстие до операции увеличения или уменьшения площади проходного сечения к достигнутому (\vec{K}_1) или достижимому (\vec{K}_2) показателю.

Подобное же соотношение принято для оценки эффективности распыла рабочей среды (топлива и другое).

Достигнут научный результат в виде модели управления электрическим полем, что позволило создать универсальные

инструменты для прошивки каналов различного профиля.

Технологический процесс повышения теплостойкости и ресурса лопаток турбин путем нанесения поверхностного слоя из керметов

Технологический процесс позволяет повысить ресурс лопаток жидкостных ракетных двигателей до уровня, позволяющего создать изделия многоразового использования с повышенным импульсом тяги.

Результаты исследований применимы для ракетных (рис. 4) и авиационных двигателей, других лопаточных машин.



Рис. 4. Фрагменты турбонасосных агрегатов (ТНА) ракетных двигателей

При проектировании комбинированного процесса использованы следующие воздействия: тепловое, химическое, механическое постоянное.

Комбинированный процесс включает плазменное напыление металла с химическим преобразованием осадка и механической раскаткой слоя. При проектировании ТП необходимо предусмотреть многократное наращивание слоев, адаптивное управление режимами наращивания покрытия по

информации о размерах и плотности непроводящих гранул, в частности изменением давления при раскатке.

Предложены следующие технологические режимы и показатели:

- состав керметного покрытия ZrO_2 ;
- толщина: подслоя из нихрома 0,13-0,15 мм; слоя кермета – 0,3 мм;
- плотность тока 10-12 А/см²;
- скорость нанесения слоев – до 1 см²/мин;
- количество слоев покрытия – до 6.

Применение покрытий из керметов позволило повысить:

- ресурс лопаток турбин при одноразовом пуске на 20-30%;
- температуру газа перед турбиной до 100-200 К, увеличить импульс тяги и обеспечить возможность многократных включений;
- надежность работы тепловых двигателей.

Выполнена критериальная оценка эффективности покрытий лопаток керметами (табл. 4).

Таблица 4

Технологические методы повышения эксплуатационных показателей проточного тракта ТНА

| Эксплуатационный показатель | Технологические методы воздействия | Коэффициенты полезности | | Ограничения |
|---|---|-------------------------|-------------|---|
| | | \bar{K}_1 | \bar{K}_2 | |
| Жаростойкость | Комбинированные покрытия с наполнителем [4] | 1,3÷1,5 | 1,5÷1,8 | Нестабильность процесса покрытия |
| Защита от внешних воздействий | Специальное покрытие, замена материалов | 1,5÷2,0 | 2,0÷10 | Повышение трудоемкости и затрат |
| Усталостная прочность и надежность | Виброударное упрочнение [4] | 1,2÷1,3 | 1,2÷1,5 | Ограниченный доступ инструмента в зону обработки |
| Снижение гидравлического сопротивления и надежности | Комбинированное экструдирование наполнителя с анодным растворением микронеровностей [4] | 1,3÷1,5 | 1,5÷2,0 | Предельное изменение проходного сечения межлопаточного канала |

В табл. 4 критерием оценки полезности являются результаты механических и усталостных испытаний (жаростойкость,

защита от внешних воздействий, прочность) и показатели пролива через межлопаточный канал (гидравлическое сопротивление потоку).

Для конкретных узлов и условий эксплуатации значения коэффициентов полезности сближаются, что открывает возможность выбора минимального количества требуемых воздействий, являющихся базой для проектирования (при необходимости) технологических процессов и разработки технического задания для исследовательских работ.

В результате реализации работы получен научный результат, включающий установление закономерностей для проектирования ТП нанесения керметов при различном сочетании металлической и керамической фазы, а также разработка нового способа получения покрытий (заявка на патент 2015101658).

Заключение

Приведенные примеры и критериальная оценка результатов позволяют утверждать, что достигнут определенный уровень технологической науки. Однако это не всегда обеспечивает получение требуемых показателей при создании перспективных наукоемких изделий, и необходимы новые исследования для завоевания рынков сбыта продукции в стране и за рубежом.

Приведенные критерии и методология их использования позволяют по анализу достигнутого и требуемого разработчиком уровня качества [9; 10], обосновать потребность, последовательность и количество технологических разработок, включая создание новых способов и устройств.

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Воронежский государственный технический университет

THE PLANNING OF COMBINED PROCESSES OF SURFACE LAYER MODIFICATION IN STANDARD COMPONENTS

S.N. Grigoriev, Doctor of Technical Science, Professor, the rector of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «MSTU-STANKIN», Moscow, Russian Federation, e-mail: rector@stankin.ru

S.V. Safonov, Candidate of Pedagogical Science, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: safonov@vorstu.ru

V.P. Smolentsev, Doctor of Engineering Science, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: ysmolent@inbox.ru

The article considers typical examples of the application of processing methods to achieve the required operating characteristics of key components, working in heavy-duty sites of products under adverse impact of aggressive environments, thermal flows or impulse loads. The criteria have been presented for assessing the results obtained through development and implementation of combined methods of surface layer modification.

The studies, conducted during the last decades, have shown that the investigation of the problem is being carried on in the following main areas:

- the modification of properties without stock removal in conjunction with focused combined impact upon the surface layer. First of all, it implies thermal, mechanical and chemical processes, as well as electromagnetic impacts, the

Литература

1. Сафонов, С.В. Модификация поверхностного слоя металлических изделий [Текст] / С.В. Сафонов, С.Н. Григорьев, В.П. Смоленцев // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. Т.11. - №2. - С.19-26.
2. Сафонов, С.В. Повышение эксплуатационных свойств изделий путем нанесения и удаления покрытий [Текст] / С.В. Сафонов, С.Н. Григорьев, В.П. Смоленцев // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т.11. - №3. - С.15-23.
3. Патент 2405662 (РФ). Способ нанесения чугунного покрытия на алюминиевые сплавы [Текст] / В.П. Смоленцев, А.В. Гребенчиков, А.В. Перова, Б.И. Омигов. Бюл. изобр. №34, 2010.
4. Сафонов С.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик изделий [Текст] / С.В. Сафонов. - Воронеж: изд. дом ВГУ, 2015. -352 с.
5. А.с. 745638 (СССР). Способ крепления нежестких деталей при размерной электрохимической обработке [Текст] / В.П. Смоленцев, З.Б. Садыков. Бюл. изобр. №25, 1980.
6. Патент 2333822 (РФ). Способ комбинированной магнитно-импульсной обработки деталей лопаточных машин и устройств для его осуществления [Текст] / В.П. Смоленцев и др. (5 авторов). Бюл. изобр. №26, 2006.
7. Патент 2538456 (РФ). Устройство для прошивки глубоких отверстий в металлических заготовках и способ с его применением [Текст] / В.П. Смоленцев и др. Бюл. изобр. №1, 2015.
8. Патент 2537409 (РФ). Инструмент и способ калибровки отверстий малого сечения в форсунках [Текст] / В.П. Смоленцев и др. Бюл. изобр. №1, 2015.
9. Смоленцев В.П. Управление системами и процессами [Текст] / В.П. Смоленцев, В.П. Мельников, А.Г. Схирдладзе. М.: Академия, 2010. 336 с.
10. Мельников В.П. Управление качеством [Текст]: учебник / В.П. Мельников, В.П. Смоленцев, А.Г. Схирдладзе. М.: Академия. 352 с.

composition of which within a combined technology permits to impart higher operating characteristics to components. In process of modification, nanofilms can be formed with a thickness which does not affect the change in product dimensions;

- removing the portion of the product's surface layer until the material having required operating characteristics is obtained;

- growing layers of materials with special properties, having a monolithic structure, in which the operating characteristics are achieved by imparting the required product characteristics (wear resistance, heat resistance, etc.) to components (including those made of other materials) via the parameters of coating deposited. The typical example of such technology is electro-spark alloying, which, in recent years, has become widely used as a technology of part geometry restoration and incremental layering, with each layer exceeding 1 mm in thickness. This gives reasons to claim that such a process is becoming a part of prototyping technology. Here, a fundamentally new result is achieved, eliminating the major flaw of the prototyping process, i.e. the volatility of strength characteristics, since coating deposition does not modify the properties of key components, while the layer strength is provided by the use of adaptive combined processes, usually with applying an electric field;

- depositing layers, which comprise pellets, made of conductive and insulating materials (e.g. ceramics, abrasive, etc.). This provides greater opportunities for developers in creating modern equipment, which is also essential, especially for leading domains of domestic machine construction, i.e. manufacturing aircraft and space equipment, repair of vehicles, etc.

Key words: combined processes, technology, surface layer formation, modification, operating characteristics

References

1. Safonov S.V. Modifikacija poverhnostnogo sloja metallicheskih izdelij [The modification of the surface layer of metal products]/ Vestnik VGTU. T.11. №2, 2015. S.19-26.
2. Safonov S.V. Povyshenie jekspluacionnyh svojstv izdelij putem nanesenija i udalenija pokrytij [Enhancing the operating properties of products by deposition and removal of coatings]/ Vestnik VGTU. T.11. №3, 2015. S.15-23.
3. Patent 2405662 (RF). Sposob nanesenija chugunnogo pokrytija na aljuminievye splavy [The method of depositing the cast iron coating onto aluminium alloys]/ V.P. Smolencev, A.V. Grebenshnikov, A.V. Perova, B.I. Omigov. Bjul. izobr. №34, 2010.
4. Safonov S.V. Tehnologicheskoe obespechenie jekspluacionnyh harakteristik izdelij [The technological support of products' operating characteristics of products]. Voronezh: izd. dom VGU, 2015. - 352 s.
5. A.s. 745638 (SSSR). Sposob krepnenija nezhestkih detalej pri razmernoj jelektrohimicheskoj obrabotke [The way of fastening non-rigid parts in dimensional electrochemical processing] / V.P. Smolencev, Z.B. Sadykov. Bjul. izobr. №25, 1980.
6. Patent 2333822 (RF). Sposob kombinirovannoj magnitno-impul'snoj obrabotki detalej lopatochnyh mashin i ustrojstv dlja ego osushhestvlenija [The method of combined magnetic impulse processing of components in impeller machines and devices for its implementation]/ V.P. Smolencev i dr. (5 avtorov). Bjul. izobr. №26, 2006.
7. Patent 2538456 (RF). Ustrojstvo dlja proshivki glubokih otverstij v metallicheskih zagotovkah i sposob s ego primeneniem [The device of deep-hole piercing in metal workpieces and the way of its application]/ V.P. Smolencev i dr. Bjul. izobr. №1, 2015.
8. Patent 2537409 (RF). Instrument i sposob kalibrovki otverstij malogo sechenija v forsunkah [The tooling and method of calibrating small-section openings in sprayers]/ V.P. Smolencev i dr. Bjul. izobr. №1, 2015.
9. Smolencev V.P. Upravlenie sistemami i processami [System and process management]. M.: Akademija, 2010. 336 s.
10. Mel'nikov V.P. Upravlenie kachestvom. Uchebnik [Quality management. A textbook]. M.: Akademija. 352 s.

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОТОВЫХ ПАНЕЛЕЙ ДЛЯ КОЖУХОВ ТУРБОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А.Н. Карпухин, И.М. Анохин

В данной статье рассмотрен технологический процесс изготовления сотовых панелей из металлических материалов. Выявлено возможное появление браковочных признаков, возникающих при формообразовании панели. Приведен расчет пружинения для деталей из титановых сплавов и нержавеющей сталей. Рассмотрен вариант корректировки пуансона универсальной конструкции на величину пружинения. Приведены теоретические зависимости, которые подтверждены экспериментальными исследованиями. Выявлены ограничения процесса формообразования гибкой с растяжением панелей, у которых перфорированный несущий слой из ОТ4-1 является наружным в связи с низкой пластичностью.

В зависимости от предельных значений деформации наружного слоя панели предложены варианты процесса формообразования панели с предварительной гибкой с растяжением с последующей калибровкой и формообразованием в штампе в печи УВН. Предлагается применение штампа с изменяемым усилием нагружения, которое увеличивается по ходу пуансона, что позволяет исключить браковочные признаки, появление которых возможно в первоначальный момент формования панели.

С целью повышения ресурсных характеристик панели рекомендуется проведение диффузионного отжига.

Приведены материалы и геометрические размеры обшивок и заполнителя, применяемого для изготовления сотовых панелей.

При предварительном растяжении панели усилие формования обеспечивает достижение в несущих слоях напряжения текучести σ_t . В зависимости от схемы нагружения панели Р-И, Р-И-Р необходимо учитывать прочность соединения пластин с подмятыми слоями панели

Ключевые слова: обшивка, пуансон, самолет, обтяжка, формообразование

Введение

Конкурентность самолета определяется следующими основными показателями: расходом топлива, конструктивно – технологическими и эксплуатационными характеристиками, соответствия акустических и экологических характеристик требованиям норм летной годности.

В связи с ужесточением требований к Нормам летной годности с 2017 года определяемых международным стандартом ИКАО, особенно актуальными стали вопросы совершенствования технологии и изготовления звукопоглощающих сотовых конструкций (ЗПК), разработки новых типов конструкций.

Методика проведения работы включает:

- проведение анализа технологического процесса этапов изготовления ЗПК.
- выявление в основных процессах возможно появления браковочных признаков.
- проведение теоретических и экспериментальных исследований.
- в теоретических исследованиях использован принцип разложения комбинированного явления на его составляющие и дифференцированного рас-

смотрения частных вопросов с обобщающим подходом.

- в экспериментальных исследованиях использовался метод делительных сеток, позволяющий получить деформации в процессе формообразования, а также оснастка и оборудование, обеспечивающие заданный технологический процесс.

Анализ технологического процесса

Металлические сотовые конструкции применяются в качестве звукопоглощающих конструкций (ЗПК) в кожухах шумоглушения в горячей части двигателя.

Основные материалы и геометрические размеры сотовых панелей приведены в таблице.

| Параметр | Тип панелей | |
|---------------------------|---|---|
| | Сварные и паяные | |
| | Обшивка | |
| Материал | ОТ4-1 ОСТ 190218-76 | 12Х18Н10Т ТУ 1-805-096-80 |
| Толщина | 0,3-0,5 | 0,3-0,5 |
| | Заполнитель | |
| Материал | ВТ1-0 ОСТ 190145-74 | 12Х18Н10Т ТУ 1-805-096-80 |
| Тип ячейки |  |  |
| Размер стороны ячейки, мм | 6,0 | 6,0 |
| Толщина стенки ячейки, мм | 0,08 | 0,08 |
| Высота заполнителя, мм | 10, 15, 20, 25 | 10, 15, 20, 25 |

Карпухин Александр Николаевич – ОАО "Металлист - Самара", технический директор, тел. 8-927-607-94-64, e-mail: tdir_m\$@metallist-\$ru
Анохин Иван Михайлович - ООО "Опытно-конструкторское бюро моторостроения", инженер-конструктор, тел. 8-910-283-59-91, e-mail: vanya.anokhin.91@mail.ru

Технологический процесс изготовления сотовой панели представлен на (рис. 1).

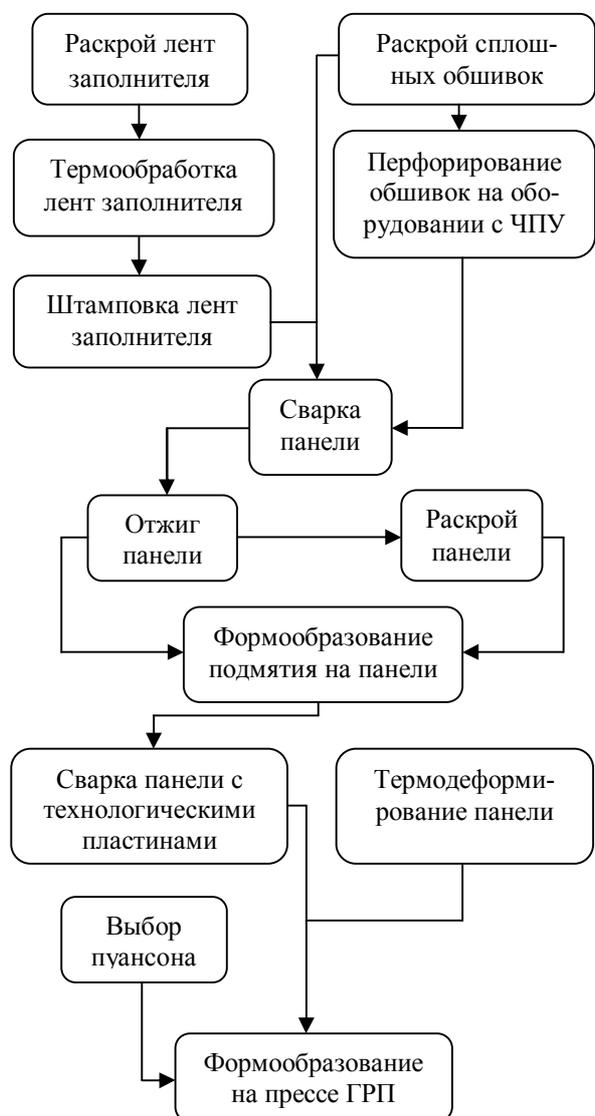


Рис. 1. Технологический процесс изготовления сотовой панели

Рассмотрим процесс формообразования панели на гибочно-растяжном прессе ГРП 160/1200 (рис. 2).

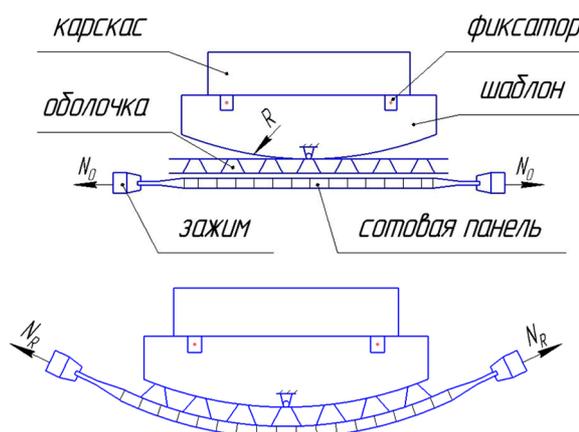


Рис. 2. Формообразования панели на гибочно-растяжном прессе

При формообразовании панелей важная роль относится к пуансонам, точности их изготовления.

Пуансоны для формообразования панелей выполняются из балинита или дерева клееной конструкции.

Трудоемкость их изготовления достаточно велика. Разработана конструкция универсального пуансона.

На (рис. 3) показан универсальный пуансон, используемый на прессе ГРП который состоит из каркаса, сменных шаблонов и гибкой оболочки.

Каркас представляет собой сварную конструкцию и имеет пазы для установки и фиксации шаблонов. Рабочая поверхность шаблонов выполнена с учетом величины пружинения и толщины гибкой оболочки.

В качестве подкрепляющих элементов гибкой оболочки использовался гофрированный наполнитель, повышающий ее жесткость.

Проведенные испытания подтвердили работоспособность данной конструкции и возможность ее применения при формообразовании цилиндрических и конических деталей с радиусами от 300 мм и более.

Универсальность данной конструкции заключается в том, что при смене типа детали надо заменить шаблон, оболочка же в данном случае остается для всей номенклатуры.

Основные браковочные признаки процесса формообразования панелей, разрыв наружной обшивки, гофрообразование внутренней обшивки, потеря устойчивости наполнителя, выскальзывание технологических пластин из зажимов, разрыв в местах крепления пластин с панелью по сварке.

Продольная растягивающая сила, приложенная к противоположным сторонам сотовой панели определяется:

$$P = (h_1\sigma_1 + h_2\sigma_2)B, \quad (1)$$

где h_1h_2 - толщины нижнего и верхнего несущих слоев;

$\sigma_1\sigma_2$ - значение напряжений нижнего и верхнего несущих слоев;

B - ширина панели.

Напряжение в несущих слоях должно быть не менее σ_T

Давление в заполнителе определяем из уравнения Лапласа:

$$g = \frac{\sigma_2 \times h_2}{R + H}, \quad (2)$$

где R - радиус кривизны пуансона;

H - высота сотовой панели.

Величина напряжения сжатия заполнителя должна удовлетворять условию:

$$g \leq [\sigma_{сж}], \quad (3)$$

где $[\sigma_{сж}]$ - предельно допустимое напряжение сжатия, определяемое при механических испытаниях образцов.

При формообразовании сотовых панелей с приваренными технологическими пластинами значение критических деформаций несущих слоев ограничивается значениями допустимых деформаций $[\delta]$, которые определяются по зависимости:

$$[\delta] = \left(\frac{0,8 \tau_{ср} \times i \pi d^2}{K \times 4th} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (4)$$

где K, n - коэффициент и модуль упрочнения материала несущего слоя;

d - диаметр ядра сварной точки ($d \approx 5$ мм);

i - количество рядов сварных точек;

t - шаг сварных точек;

h - толщина несущего слоя;

$\tau_{ср}$ - напряжение среза сварной точки;

Для титановых сплавов:

$$\tau_{ср} \approx 18 + 0,523\sigma_{0,2}, \quad (5)$$

Для нержавеющей сталей

$$\tau_{ср} \approx 0,6\sigma_{в}, \quad (6)$$

где $\sigma_{0,2}$ - условный предел текучести несущего слоя.

$\sigma_{в}$ - предел прочности несущего слоя.

Радиус пуансона, скорректированный на величину пружинения, определяется по зависимости:

$$R_n = \frac{R_{дем.}}{1 - xR_{дет.}}, \quad (7)$$

где $R_{дем.}$ - радиус детали;

x - величина пружинения.

Для цилиндрического пуансона x определяется:

$$x = \frac{1}{EJ} (\sigma_1 \times h_1 \times \delta_1 + \sigma_2 \times h_2 \times \delta_2), \quad (8)$$

где EJ - обобщенная жесткость панели, определяемая расчетным или экспериментальным методом;

δ_1, δ_2 - расстояние от середины несущих слоев до нейтральной оси.

При исследовании пружинения сотовых панелей определяли на реальных деталях в цеховых условиях. Оболочки из сплава ОТ4-1 и 12Х18Н10Т подвергали деформации.

Перед обтяжкой на внутреннюю и наружную стороны сотовой панели наносили делительную сетку с базой 50×50 мм. При обтяжке измеряли деформацию предварительного растяжения ϵ , усилие растяжения P , углы поворотов правого и левого зажимов прессы α_1 и α_2 . После обтяжки определяли деформации по длине наружной и внутренней обшивки и радиусы кривизны R_{II} .

Несовпадение результатов теоретических и экспериментальных исследований (рис. 3) достигало 9%, что приемлемо для проектирования оснастки и разработки технологического процесса формообразования сотовых панелей.

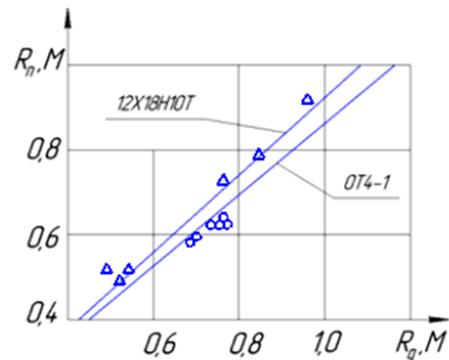


Рис. 3

Учитывая, что неприлегание сотовой панели к контрольному шаблону допустимо не более 2 мм, выбирали режимы формообразования, обеспечивающие требуемую точность. Исследованы режимы формообразования панели по схемам растяжение - изгиб, растяжение - изгиб - растяжение. Распределение деформаций на верхней и нижней обшивках должно быть таким, чтобы перфорированная обшивка, имеющая ограничения по предельным возможностям на растяжение, получила минимальные деформации.

Проводимые механические испытания образцов на растяжение показали, что величина относительного удлинения перфорированных образцов для ОТ4-1 3,0%, для 12Х18Н10Т 10% при степени перфорации 10%.

Особенности технологического процесса изготовления панели с наружной перфорированной обшивкой из титановых сплавов объясняются её недостаточной пластичностью. Процесс формообразования панели можно разделить на два этапа:

- формообразование на прессе ГРП со значительной степенью пружинения;
- окончательная калибровка в штампе с нагревом в печи УВН.

Этот процесс осуществляется при степени перфорации наружной обшивки до 10%. При большой степени перфорации процесс формообразования осуществляется в штампе с нагревом в печи УВН.

Наибольший эффект формообразования достигается в штампе с регулируемым усилием нагружения, т.е. увеличением усилия при перемещении пу-

ансона, что исключает недоформовку панели и обеспечивает заданную точность. Нагрев в вакуумной печи практически исключает наводороживание обшивки из титанового сплава.

С целью увеличения механических характеристик панели при последующих испытаниях на сжатии, сдвиг и отрыв осуществляется диффузионный отжиг.

Выводы

Рассмотрен технологический процесс изготовления сотовых панелей. Проведен анализ возможного появления браковочных признаков, возникающих в процессе формообразования панелей.

Определены значения усилий предварительного растяжения панели с учетом ограниченных значений допустимых деформаций возникающих в соединениях пластины с несущими слоями панели.

ОАО "Металлист - Самара"

ООО "Опытно-конструкторское бюро моторостроения", г. Воронеж

FEATURE TECHNOLOGY SHAPING METAL HONEYCOMB FOR A CASING OF A TURBOJET

A.N. Karpuhin, Technical Director of JSC "Metallist - Samara", Samara, Russian Federation, e-mail: [m@metallist-\\$ru](mailto:m@metallist-$ru)

I.M. Anokhin, Design Engineer, Ltd. "Experimental Design Bureau Motors", Voronezh, Russian Federation, e-mail: vanya.anokhin.91@mail.ru

This article describes the process of manufacturing cellular panels of metal materials. It revealed the possible appearance of rejection symptoms occurring in forming the panel. When is led springing-payment for parts made of titanium alloys and stainless steels. A variant of adjustment of the punch universal design by the amount of springback. The theoretical dependence, which are confirmed by experimental studies. Revealed limitations of the process of forming a flexible stretch panels in which the perforated support layer of the outer OT4-1 is due to low plasticity.

Depending $\approx 3\%$ on the limit of the outer layer of the panel deformation values of the variants of the process of forming the panel with advanced flexible with stretching, followed by calibration and shaping in a die in UVN furnace. It provides the use of a stamp with a variable loading force which increases in the course of the punch that eliminates rejection symptoms, the appearance of which may point to the original panel molding.

In order to improve the characteristics of the resource panel, we recommend carrying out the diffusion annealing.

Results materials and geometrical dimensions of casings and filler used for manufacturing cellular panels.

When the preliminary tensile force shaping panel achieves in bearing layers in the flow-stress σ . Depending on panel loading and P-I, P-I-P must consider the strength of the co-compound layers connection plates with crushed layers panel.

Key words: Trim, punch, airplane, close-fitting, shaping.

References

1. Voropayev A.A., Del' G.D., Oding S.S. Formoobrazovaniye trekhsloynnykh obolochek po tsilindricheskomu puansonu na gibochno - rastyazhnom presse [Formoobrazovanie sandwich shells on the cylindrical punch to bending - stretching press] // Kuznechno – shtampovochnoye proizvodstvo [Forging - stamping production]. 1982. S.12-15 number 3;

2. Molod M.V. Opredeleniye parametrov perforirovannykh obshivok pri izgotovlenii sotovykh paneley zvukopogloshchayushchikh konstruksiy [Defining the parameters of trans-perforated casings in the production of honeycomb panels sound-absorbing structures] // Vestnik samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akad. S.P. Koroleva, spets vypusk, podgotovlennyy po materialam mezhdunarodnoy nauchno - tekhnicheskoy konferentsii. Problemy i perspektivy dvigatelestroyeniya [Bulletin of the Samara State Aerospace University. Acad. S.P. Koroleva, special edition, prepared on materials of the international scientific - technical conference. Problems and prospects of engine]. 2014-4.4. №5 / 47 /S. 56-62.

Проведен теоретический и экспериментальный анализ формообразования панели гибкой с растяжением, определен выбор технологических процессов формообразования панелей с ограниченной пластичностью.

Литература

1. Воропаев, А.А.. Формообразование трехслойных оболочек по цилиндрическому пуансону на гибочно - растяжном прессе [Текст] / А.А. Воропаев, Г.Д. Дель, С.С. Одинг // Кузнечно – штамповочное производство. - 1982. № 3. - С.12-15.

2. Молод, М.В. Определение параметров перфорированных обшивок при изготовлении сотовых панелей звукопоглощающих конструкций [Текст] / М.В. Молод // Вестник самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С.П. Королева, спец выпуск, подготовленный по материалам международной научно - технической конференции. Проблемы и перспективы двигателестроения. - 2014. - 4.4. №5/47. -С. 56-62.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДВУХСЛОЙНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР ZnO/ZnO-Fe

Ю.Е. Калинин, В.А. Макагонов, С.Ю. Панков, А.В. Ситников

Методом ионно-лучевого распыления получены образцы двухслойной тонкопленочной структуры ZnO/ZnO-Fe с различным процентным содержанием Fe. В диапазоне 300 – 700 К были исследованы температурные зависимости удельного электрического сопротивления слоев ZnO и ZnO-Fe, а также термовольтаического отклика в образцах двухслойной тонкопленочной структуры ZnO/ZnO-Fe с различным процентным содержанием Fe. Для структур с содержанием железа 5 и 10 ат. % зависимости термовольтаического эффекта от температуры монотонно возрастают в диапазоне 300 – 700 К, что связывается с ростом подвижности носителей заряда. Температурная зависимость термовольтаического отклика для структуры с содержанием Fe 19 ат. % в диапазоне 300 – 600 К имеет положительный знак и проходит через максимум при 500 К, а при $T \sim 600$ К изменяет свой знак на отрицательный.

Анализ зависимостей, перестроенных в координатах $\ln U = f(1/T)$, показал, что температурная зависимость термовольтаического эффекта в исследуемой системе описывается законом Аррениуса с энергией активации $0.14 \pm 0,01$ эВ

Ключевые слова: оксидные полупроводники, удельное электрическое сопротивление, термовольтаический эффект, термоэд

Введение

В настоящее время, в связи с ухудшением экологической обстановки и истощаемостью запасов полезных ископаемых, все большее распространение получает альтернативная энергетика, одним из направлений которой является прямое преобразование тепловой энергии в электрическую. К сожалению, эффективность современных термоэлектрических генераторов мала, что не дает возможности для их широкого применения. Поэтому весьма актуальными задачами являются как разработка новых термоэлектрических материалов с высокой термоэлектрической добротностью, так и использование новых эффектов преобразования тепла в электричество.

К таким новым эффектам можно отнести открытый в 2000 году термовольтаический эффект, обнаруженный впервые в градиентных образцах моносulfида самария SmS [1-4], который заключается в том, что при нагревании в условиях отсутствия внешних градиентов температуры (в отличие от эффекта Зеебека, где этот градиент необходим), на противоположных гранях образца, возникает электрическое поле. Термоэлектрический преобразователь на основе данного эффекта обладает рядом преимуществ перед устройствами на эффекте Зеебека: отсутствие необходимости создания градиента температуры, более высокий удельный КПД преобразования, меньший вес [5].

Помимо полупроводниковых структур на основе сульфида самария, термовольтаический эффект также был обнаружен и в других материалах [6,7]. При этом физическая природа эффекта до конца не ясна, что требует проведения дальнейших исследований. Поэтому изучение данного эффекта как уже в синтезированных, так и в новых системах позволит расширить температурный интервал, увеличить КПД и создать предпосылки к разработке более эффективных термоэлектрических преобразователей.

В связи с этим, целью данной работы является исследование влияния особенностей электропереноса на термовольтаический отклик в двухслойных тонкопленочных структурах ZnO/ZnO-Fe с различным содержанием Fe.

Образцы и методика эксперимента

Для получения двухслойных тонкопленочных структур ZnO/ZnO-Fe использовали метод ионно-лучевого распыления [8]. Формирование двухслойных структур ZnO/ZnO-Fe происходило в две стадии. Вначале на подложку из ситалла было проведено напыление слоя чистого ZnO путем распыления керамической мишени в вакууме не хуже $P=10^{-2}$ Па. Керамическая мишень размером 280x80 мм² представляла из себя керамические пластины состава ZnO, закрепленные на медном водоохлаждаемом основании. Затем, после формирования первого слоя чистого ZnO поверх него был напылен слой ZnO-Fe в широком диапазоне концентрации Fe по длине подложки. Для этого на поверхность мишени из чистого ZnO были неравномерно установлены вдоль длины подложки навески чистого Fe.

Помимо получения двухслойной структуры ZnO/ZnO-Fe, в одном цикле напыления, для изучения характеристик каждого из слоев, были получены образцы пленок ZnO и ZnO-Fe (с аналогичными двухслойным структурам процентным содержанием Fe).

Калинин Юрий Егорович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: kalinin48@mail.ru

Макагонов Владимир Анатольевич – ВГТУ, инженер, e-mail: vlad_makagonov@mail.ru

Панков Сергей Юрьевич – ВГТУ, аспирант, e-mail: srgrank@mail.ru

Ситников Александр Викторович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: sitnikov04@mail.ru

Напыление проводили в течение 6 часов (каждый слой по 3 часа). Толщина слоев определялась при помощи интерферометра Линника и составляла около 3 мкм (таким образом, общая толщина двухслойной структуры была равна 6 мкм).

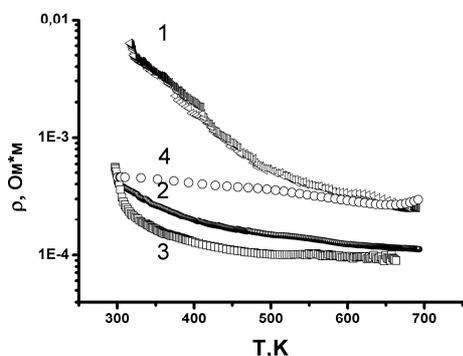
Химический состав слоя ZnO-Fe был исследован с помощью электронно-зондового микроанализа. Для исследования электрических свойств использовали образцы с различным содержанием Fe в слое ZnO-Fe: 5, 10, 19 ат. %.

Для измерения термовольтаического отклика в высокотемпературном диапазоне температур была разработана и сконструирована установка аналогичной конструкции, описанной в [1].

Для контроля температуры образца на его концах устанавливали две термопары хромель-алюмель. Для измерения ЭДС, а также удельного электрического сопротивления (двухзондовым методом) с образца были использованы одноименные ветви термопар.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Для определения характеристик каждого из слоев структуры ZnO/ZnO-Fe, были исследованы температурные зависимости электрического сопротивления в диапазоне 300 – 700 К тонкопленочных образцов ZnO и ZnO-Fe с различным процентным содержанием Fe (рис. 1).



1 – ZnO-Fe (19 ат. % Fe), 2 – ZnO-Fe (5 ат. % Fe), 3 – ZnO-Fe (10 ат. %) Fe, 4 – ZnO

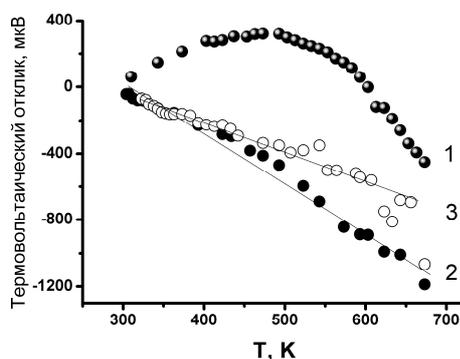
Рис. 1. Зависимости удельного электрического сопротивления тонкопленочных образцов от температуры

Все образцы имеют полупроводниковый тип проводимости, значения удельного электросопротивления образца ZnO (кривая 4) больше, чем образцов ZnO-Fe (5 ат. % Fe, кривая 2) и ZnO-Fe (10 ат. % Fe, кривая 3). Удельное электрическое сопротивление образца ZnO-Fe (19 ат. % Fe, кривая 1) в диапазоне температур 300 – 600 К выше, чем у образца ZnO (кривая 4), но после температуры 600 К электрическое сопротивление ZnO-Fe (19 ат. % Fe) становится ниже, чем у ZnO.

Для тонких пленок ZnO максимальная температура, при которой не происходит структурных и

фазовых превращений $T_{\max} \sim 675$ К, в то время как для образцов ZnO-Fe, вне зависимости от процентного содержания Fe, обратный ход электрического сопротивления соответствует прямому ходу вплоть до 720 К.

Далее были исследованы температурные зависимости термовольтаического отклика в двухслойных структурах ZnO/ZnO-Fe (рис. 2) с различным процентным содержанием Fe. Для образцов с содержанием Fe 10 ат. % и 5 ат. % термовольтаический эффект имеет отрицательный знак и линейно возрастает с увеличением температуры. Максимальное по модулю значение термовольтаического отклика достигает 1200 мкВ для образца с содержанием Fe 10 ат. % при 673 К. Для образца с содержанием Fe 19 ат. % зависимость термовольтаического отклика в диапазоне 300 – 600 К имеет положительный знак и проходит через максимум при 500 К. При температуре ~ 600 К термовольтаический отклик изменяет свой знак на отрицательный.



1 – 19% Fe, 2 – 10% Fe, 3 – 5% Fe

Рис. 2. Термовольтаический отклик в двухслойных структурах ZnO/ZnO-Fe с различным содержанием Fe

Как известно, в случае донорного полупроводника зависимость электрического сопротивления имеет следующий вид [9]:

$$\rho = 1/e\mu n \quad (1)$$

где μ – подвижность носителей заряда; e – заряд электрона; n – концентрация носителей заряда.

Поскольку синтезированные слои пленок ZnO относятся к широкозонным полупроводникам (ширина запрещенной зоны 3,37 эВ), то в исследуемой области температур температурная зависимость удельного электрического сопротивления будет определяться температурной зависимостью подвижности носителей заряда. Наблюдаемое снижение электрического сопротивления для тонких слоев ZnO до температуры $T \sim 670$ К (рис. 1, кривая 4) при этом можно было связать с рассеянием на заряженных собственных точечных дефектах, когда подвижность растет по степенному закону пропорциональному $T^{3/2}$ (рис. 3). Более точный анализ экспе-

риментальной зависимости электрического сопротивления от температуры показал, что последнее снижается с более низким показателем степени (~ 1.3). Такое расхождение можно объяснить вкладом переноса носителей заряда по границам зерен. При температурах $T > 670$ К начинает доминировать механизм рассеяния на тепловых колебаниях решетки, подвижность носителей заряда с температурой падает и электрическое сопротивление растет.

При распылении составной мишени из ZnO+Fe атомы железа могут входить в состав тонкой пленки как в виде нейтральных атомов, так и в виде ионов Fe^{2+} и Fe^{3+} . Все это затрудняет анализ температурной зависимости электрического сопротивления таких слоев. В результате формируется неравновесная структура, электрическая проводимость в которой определяется типом носителей заряда и их подвижностью. При этом абсолютное значение удельного электрического сопротивления, а следовательно, и подвижности носителей заряда при разных концентрациях атомов железа отличаются. Если для пленок ZnO-Fe с 10 ат. % и 5 ат. % Fe в области температур 350 – 600 К электрическое сопротивление ниже, то подвижность носителей выше, чем в слое ZnO, а для пленок ZnO-Fe содержанием 19 ат. % Fe электрическое сопротивление выше, а подвижность носителей заряда – ниже.

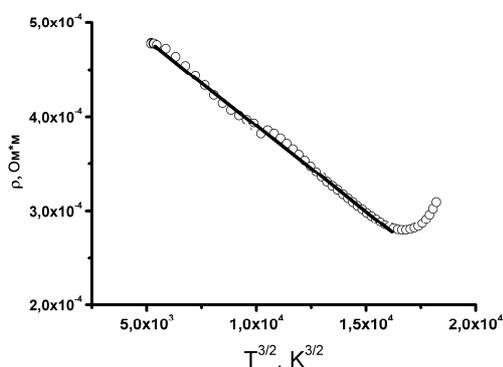


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления образца ZnO от $T^{3/2}$

Различие в значениях подвижностей носителей заряда в различных слоях тонких пленок приводит к возникновению термовольтаического эффекта в двухслойных структурах. При этом, для образцов двухслойной структуры ZnO/ZnO-Fe (10 ат. % Fe) и ZnO/ZnO-Fe (5 ат. % Fe) характерно линейное увеличение термовольтаического отклика с температурой (рис. 2). Знак отклика при этом отрицательный.

В этом случае из-за разницы подвижности носителей заряда в слоях, электроны из слоя ZnO-Fe диффундируют в слой ZnO, возникает электрическое поле E , приводящее к противоположному потоку носителей и в условиях равновесия на концах образца возникает напряжение термовольтаического эффекта (рис. 4).

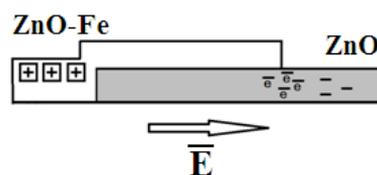


Рис. 4. Схема возникновения термовольтаического отклика в двухслойных структурах ZnO/ZnO-Fe (5 ат. % Fe) и ZnO/ZnO-Fe (10 ат. % Fe)

Если анализировать температурную зависимость термовольтаического отклика образцов двухслойной структуры ZnO/ZnO-Fe (19 ат. % Fe), то можно выделить две области I (роста) и II (спада) (рис.2). В области I термовольтаический отклик имеет положительные значения, при этом электропроводность слоя ZnO ниже, чем слоя ZnO-Fe вплоть до 600 К. В таком случае, электроны из слоя ZnO диффундируют в слой ZnO-Fe, возникает электрическое поле E (рис.5 а) и в результате на концах образца возникает напряжение обратной полярности.

При достижении температуры 600 К изменяется электропроводность слоев ZnO и ZnO-Fe (рис. 1) и, следовательно, термовольтаический отклик изменяет свой знак на отрицательный (рис. 2). В этом случае, как и для образцов двухслойной структуры ZnO/ZnO-Fe 10 ат. % Fe и ZnO/ZnO-Fe 5 ат. % из-за разницы подвижности носителей заряда, электроны из слоя ZnO-Fe диффундируют в слой ZnO, возникает электрическое поле E (рис. 5 б).

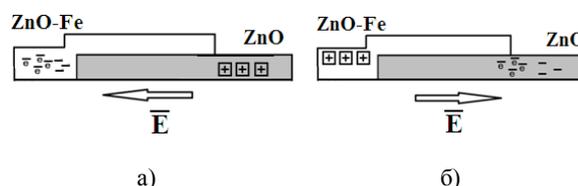
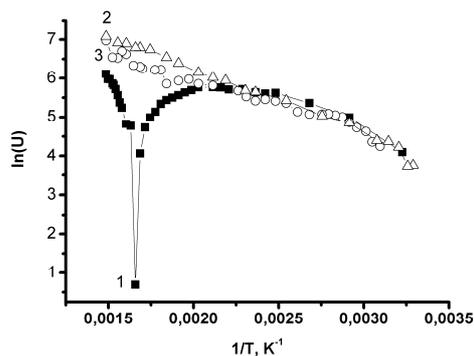


Рис. 5. Схема возникновения термовольтаического отклика в двухслойных структурах ZnO/ZnO-Fe (19 ат. % Fe)

Для оценки энергии активации подвижностей заряда в синтезированных структурах температурные зависимости термовольтаического эффекта были перестроены в координатах $\ln U = f(1/T)$ (рис. 6). Представленный на рисунке график имеет линейную зависимость. Если полагать, что подвижность носителей заряда описывается уравнением

$$\mu = \mu_0 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (2)$$

где μ_0 – постоянная; ΔE – энергия активации подвижности носителей заряда; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура, то из экспериментальных результатов можно оценить энергию активации подвижности носителей заряда, которая равна $\Delta E = 0.14 \pm 0.01$ эВ.



1 – 19 ат. % Fe, 2 – 5 ат. % Fe, 3 – 10 ат. % Fe

Рис. 6. Температурные зависимости термоэлектрического отклика в двухслойных структурах ZnO/ZnO-Fe с различным содержанием Fe в координатах $\ln U = f(1/T)$

Таким образом, наблюдаемый в двухслойных структурах ZnO/ZnO-Fe термоэлектрический эффект можно связать с различной величиной подвижности носителей заряда в слоях ZnO и ZnO-Fe, что объясняет небольшую величину измеряемой эдс. Для наблюдения более высоких значений эдс термоэлектрического эффекта необходимо, чтобы в двухслойных структурах помимо разной величины подвижности носителей заряда при исследуемых температурах имело место большая разница концентрации носителей заряда.

Заключение

Методом ионно-лучевого распыления синтезированы двухслойные образцы ZnO/ZnO-Fe, в которых исследованы температурные зависимости удельного электрического сопротивления и эдс термоэлектрического эффекта. Установлено, что исследованные зависимости термоэлектрического эффекта в структурах с процентным содержанием железа 5 и 10 ат. % железа монотонно возрастают от комнатной температуры до $T \sim 700$ К, что связывается с ростом подвижности носителей заряда. Для структуры с содержанием Fe 19 ат. % зависимость термоэлектрического отклика в диапазоне 300 – 600 К имеет положительный знак и проходит через максимум при 500 К. При температуре ~ 600 К термоэлектрический отклик в этой системе изменяет свой знак на отрицательный.

Воронежский государственный технический университет

ELECTRICAL PROPERTIES OF BILAYER THIN-FILM STRUCTURES ZnO/ZnO-Fe

Yu.E. Kalinin Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Full Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kalinin48@mail.ru

V.A. Makagonov Engineer, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: vlad_makagonov@mail.ru

Показано, что температурная зависимость термоэлектрического эффекта в исследуемой системе описывается законом Аррениуса с энергией активации $0.14 \pm 0,01$ эВ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-08-36411).

Литература

1. Механизм возникновения электродвижущей силы при нагревании кристаллов SmS [Текст] / В.В. Каминский, Л.Н. Васильев, М.В. Романова, С.М. Соловьев // Физика твердого тела. – 2001. – Т. 43. – Вып. 6. – С. 997 – 999.
2. Каминский В.В. Дефектные ионы самария и эффект генерации электродвижущей силы в SmS [Текст] / В.В. Каминский, А.В. Голубков Л.Н. Васильев // Физика твердого тела. – 2002. – Т. 44. – Вып. 8. – С. 1501 – 1505.
3. Каминский В.В. Термоэлектрический эффект в тонкопленочных структурах на основе сульфида самария [Текст] / В.В. Каминский, М.М. Казанин // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34. – Вып. 8. – С. 92 – 94.
4. Каминский В.В. Термоэлектрический эффект в гетероструктурах на основе сульфида самария с составом $\text{Sm}_{1-x}\text{Eu}_x\text{S}$ [Текст] / В.В. Каминский, М.М. Казанин, С.М. Соловьев, А.В. Голубков. // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82. – Вып. 6. – С. 142 – 144.
5. Термоэлектрический генератор (варианты) и способы изготовления термоэлектрического генератора [Текст] / В.В. Каминский, А.В. Голубков, М.М. Казанин, И.В. Павлов, С.М. Соловьев, Н.В. Шаренкова // Патент № 2303834 от 27 июля 2007 г.
6. Саидов А.С. Термоэлектрический эффект в варизонном твердом растворе $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) [Текст] / А.С. Саидов, А.Ю. Лейдерман, А.Б. Каршиев // Письма в ЖТФ. – 2016. – Том 42. – Вып. 14. – С. 21 – 27.
7. Термоэлектрический эффект в оксиде цинка, неоднородно легированном примесями с переменной валентностью [Текст] / И.А. Пронин, И.А. Аверин, А.С. Божинова А.Ц. Георгиева, Д.Ц. Димитров, А.А. Карманов, В.А. Мошников, К.И. Папазова, Е.И. Теруков, Н.Д. Якушова // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41. – Вып. 19. – С. 22 – 28.
8. Планарный эффект Холла и анизотропное магнитосопротивление в слоистых структурах $\text{Co}_{0.45}\text{Fe}_{0.45}\text{Zr}_{0.1}/\text{a-Si}$ с перколяционной проводимостью [Текст] / Б.А. Аронзон, А.Б. Грановский, Ю.Е. Калинин, С.Н. Николаев, В.В. Рыльков, А.В. Ситников, В.В. Тугушев // ЖЭТФ. – 2006. – Т.129. – Вып.7. – С.127 – 136.
9. Шалимова К.В. Физика полупроводников [Текст] / К.В. Шалимова. - М.: Энергия, 1976. – 472 с.

S.Yu. Pankov Postgraduate, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: srgpank@mail.ru

A.V. Sitnikov Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Full Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: sitnikov04@mail.ru

Bilayer thin film structure ZnO / ZnO-Fe samples with different percentages of Fe obtained by ion beam sputtering. Temperature dependence of electrical resistivity of ZnO and ZnO-Fe layers and thermovoltaic effect of the bilayer structure ZnO thin film / ZnO-Fe samples with different percentages of Fe in the range 300 - 700 K were investigated.

Temperature dependencies of athermovoltaic effect for structures with content 5 and 10 at. % Fe monotonically increase in the range 300 - 700 K. This may be due to the increase in the mobility of the charge carriers. Temperature dependence of a thermovoltaic response for a structure with a Fe content of 19 at. % in the range 300 - 600 K is a positive sign and passes through a maximum at 500 K, and at $T \sim 600$ K changes its sign to negative.

Analysis of dependencies, into coordinates $\ln U = f(1/T)$, has shown that the temperature dependence thermovoltaic effect in the system is described by the Arrhenius law with an activation energy of 0.14 ± 0.01 eV

Key words: oxides semiconductors, electrical resistivity, thermovoltaic effect, thermopower

References

1. V.V. Kaminskij, L.N. Vasil'ev, M.V. Romanova, S.M. Solov'ev. *Mehanizm voznikovenija jelektrodvizhushhej sily pri nagrevanii kristallov SmS* [The mechanism of the electromotive force when heated crystal SmS]. *Fizika tverdogo tela*. – 2001. – T. 43. – Vyp. 6. – S. 997 – 999.
2. V.V. Kaminskij, A.V. Golubkov L.N. Vasil'ev. *Defektnye iony samarija i jeffekt generacii jelektrodvizhushhej sily v SmS* [Defective samarium ions and the effect of generating an electromotive force in SmS]. *Fizika tverdogo tela*. – 2002. – T. 44. – Vyp 8. – S. 1501 – 1505.
3. V.V. Kaminskij, M.M. Kazanin. *Termovol'taicheskij jeffekt v tonkoplenochnyh strukturah na osnove sul'fida samarija* [Thermovoltaic effect in thin film structures based on samarium sulfide]. *Pis'ma v ZhTF*. – 2008. – T. 34. – Vyp. 8. – S. 92 – 94.
4. V.V. Kaminskij, M.M. Kazanin, S.M. Solov'jov, A.V. Golubkov. *Termovol'taicheskij jeffekt v geterostrukturah na osnove sul'fida samarija s sostavom $Sm_{1-x}Eu_xS$* [Thermovoltaic effect in heterostructures on the basis of the composition of samarium sulfide $Sm_{1-x}Eu_xS$]. *Zhurnal tehnicheckoj fiziki*. – 2012. – T. 82. – Vyp. 6. – C. 142 – 144.
5. Kaminskij V.V., Golubkov A.V., Kazanin M.M., Pavlov I.V., Solov'jov S.M., Sharenkova N.V. *Termojel'ektricheskij generator (varianty) i sposoby izgotovlenija termojelekttricheskogo generator* [The thermoelectric generator (variants) and methods of manufacturing a thermoelectric generator]. Patent № 2303834 ot 27 ijulja 2007 g.
6. A.S. Saidov, A.Ju. Lejderman, A.B. Karshiev. *Termovol'taicheskij jeffekt v varizonnom tverdom rastvore $Si_{1-x}Ge_x$ ($0 \leq x \leq 6$)* [Thermovoltaic effect in variable-gap solid solution $Si_{1-x}Ge_x$ ($0 \leq x \leq 6$)]. *Pis'ma v ZhTF*. – 2016. -Tom 42. - Vyp. 14. – S. 21 – 27.
7. I.A. Pronin, I.A. Averin, A.S. Bozhinova A.C. Georgieva, D.C. Dimitrov, A.A. Karmanov, V.A. Moshnikov, K.I. Papazova, E.I. Terukov, N.D. Jakushova. *Termovol'taicheskij jeffekt v okside cinka, neodnorodno legirovannom primesjami s peremennoj valentnost'ju* [Thermovoltaic effect in inhomogeneously doped with variable valence zinc oxide]. *Pis'ma v ZhTF*. – 2015. – T. 41. – Vyp. 19. – S. 22 – 28.
8. B.A. Aronzon, A.B. Granovskij, Ju.E. Kalinin, S.N. Nikolaev, V.V. Ryl'kov, A.V. Sitnikov, V.V. Tugushev // *Planarnyj jeffekt Holla i anizotropnoe magnitosoprotivlenie v sloistyh strukturah $Co_{0.45}Fe_{0.45}Zr_{0.1}/a-Si$ s perkoljacionnoj provodimost'ju* [The planar Hall effect and anisotropic magnetoresistance in $Co_{0.45}Fe_{0.45}Zr_{0.1}/a-Si$ layer structures with percolation conductivity]. *ZhJeTF*, 2006, T.129, vyp.7, S.127-136.
9. Shalimova K.V. *Fizika poluprovodnikov* [Physics of semiconductors]. - M.: Jenergija, 1976. – 472 p.

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

И.М. Голев, А.А. Гребенников, А.В. Сергеев

Разработана экспериментальная установка для измерения действительной и мнимой части комплексной магнитной проницаемости сверхпроводников при температуре 77 К. Ее работа основана на индуктивном методе, принцип которого заключается в регистрации измерительной катушкой изменения плотности магнитного потока внутри сверхпроводника, помещенного в область действия двух магнитных полей – постоянного и переменного малой амплитуды. Установка позволяет проводить измерения в постоянных магнитных полях напряженностью до 0,15 Тл и переменных магнитных полях с амплитудным значением напряженности $10^{-4} \div 3 \cdot 10^{-1}$ мТл и частотой 100 Гц \div 100 кГц. Процесс регистрации экспериментальных данных осуществляется автоматически универсальным цифровым вольтметром В7-78/1, которым управляет специально разработанное программное обеспечение. Программное обеспечение считывает данные с В7-78/1, проводит их первичную обработку и выводит на графики и в файл. Эксперименты, проведенные на образцах высокотемпературных сверхпроводников $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$, позволили определить влияние амплитуды и частоты переменного магнитного поля на глубину его проникновения в образец и величину диссипируемой при этом энергии. Установлено, что увеличение, как амплитуды, так и частоты переменного магнитного поля приводит к росту действительной и мнимой части комплексной магнитной проницаемости

Ключевые слова: установка, сверхпроводник, комплексная магнитная проницаемость, индуктивный метод

Введение

Важным параметром, характеризующим малопольевые электродинамические свойства гранулированных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в условиях наложения синусоидального переменного поля $b(t) = b_m \cdot \cos \omega t$, где ω – циклическая частота, является комплексная магнитная проницаемость (μ^*). При действии на сверхпроводник суперпозиции полей усредненная по объему сверхпроводника индукция поля B_{cp} может быть разложена в комплексный ряд Фурье [1, 2, 3]:

$$B_{cp} = B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [\mu'_n \cdot h_m \cdot \cos n\omega t + \mu''_n \cdot h_m \cdot \sin n\omega t], \quad (1)$$

где B_0 – средняя индукция поля в сверхпроводнике при $h_m=0$;

μ'_n – действительная часть μ^* ;

μ''_n – мнимая часть μ^* ;

ω – циклическая частота;

h_m – амплитуда напряженности переменного магнитного поля.

Величины μ'_1 и μ''_1 для первой гармоники сигнала-отклика ($n = 1$) согласно формулам для коэффициентов ряда Фурье определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \mu'_1 = \mu'_1 &= \frac{1}{\pi h_m} \int_0^{2\pi/\omega} \omega B_{cp} \cos \omega t dt, \\ \mu''_1 = \mu''_1 &= \frac{1}{\pi h_m} \int_0^{2\pi/\omega} \omega B_{cp} \sin \omega t dt. \end{aligned} \quad (2)$$

Действительная часть μ^* характеризует степень проникновения переменного поля в сверхпроводник, а мнимая часть – диссипацию энергии переменного поля в сверхпроводнике [4].

Исследования поведения низкочастотной комплексной магнитной проницаемости сверхпроводников в зависимости величин постоянного и переменного магнитных полей различных частот позволяют получать дополнительную информацию о физических свойствах ВТСП, имеющих сложную кристаллическую структуру, которая включает области с различным химическим составом, гранулы и межгранульную среду.

В работе представлена экспериментальная установка для измерений низкочастотной комплексной магнитной проницаемости и спектрального состава сигнала отклика сверхпроводников при температуре 77 К, постоянных магнитных полей до 0,15 Тл, переменных магнитных полей $10^{-4} \div 3 \cdot 10^{-1}$ мТл и частотой 100 Гц \div 100 кГц.

Стенд включает в себя измерительные зонды, магнитную систему и электронные схемы для обработки сигналов.

Методика измерений

Общий принцип индуктивных методов исследования сверхпроводников заключается в следующем. Образец сверхпроводника помещается в области однородного постоянного магнитного поля, на которое накладывается переменное поле малой амплитуды. Возникающее при этом изменение плотности магнитного потока внутри сверхпроводящего образца регистрируется измерительной катушкой,

Голев Игорь Михайлович – ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», д-р физ.-мат. наук, доцент, e-mail: imgolev@gmail.com

Гребенников Антон Александрович – ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», канд. физ.-мат. наук, преподаватель, e-mail: anton18885@yandex.ru

Сергеев Александр Викторович – ВГТУ, аспирант, e-mail: sergeev-av@bk.ru

охватывающей образец. Наводимая в ней ЭДС индукции анализируется электронной схемой.

В описанном стенде использовался метод измерения полного потока при наложении синусоидального переменного поля, позволяющий одновременно разделять общий сигнал-отклик сверхпроводника на активную и диссипативную компоненты.

Рассмотрим измерительную систему зонда (рис. 1), включающую в себя измерительную катушку с образцом (как правило, цилиндрическим), дифференциально включенную с компенсационной катушкой. Вся система помещена в постоянное продольное магнитное поле B_0 . Пусть коллинеарно постоянному полю наложено переменное поле $h(t)=h_m g(t)$, где $g(t)=\sin \omega t$. Изменение индукции переменного поля $h(t)$ в измерительной системе от $b(t)$ до $b(t)+\delta b(t)$ вызывает приращение магнитного потока

$$\delta \Phi(t) = \delta \Phi_s(t) + \delta \Phi_p(t), \quad (3)$$

где $\delta \Phi_s(t)$ – изменение магнитного потока на поверхности сверхпроводника;

$\delta \Phi_p(t)$ – изменение магнитного потока в пространстве между образцом и измерительной катушкой.

Пусть R – радиус образца, ΔL – средняя величина зазора между образцом и измерительной катушкой. Тогда общее приращение магнитного потока будет равно

$$\delta \Phi(t) = \pi [R^2 - (R - \lambda(t))^2] \delta b(t) + \pi \Delta L [2R + \Delta L] \delta b(t), \quad (4)$$

где $\lambda(t)$ – глубина проникновения переменного магнитного поля $b(t)$. Поскольку

$\delta b(t) = \mu_s \mu_0 \gamma h_m \frac{dg}{dt} \delta t$, то в приемной катушке, охватывающей образец, индуцируется напряжение

$$\begin{aligned} U_s(t) &= \frac{\delta \Phi}{\delta t} = n \mu_s \mu_0 \gamma h_m \frac{dg}{dt} \pi [R^2 - (R - \lambda(t))^2] + \\ &+ n \mu_s \mu_0 \gamma h_m \frac{dg}{dt} \pi \Delta L [2R + \Delta L] = \\ &= n \mu_s \mu_0 \gamma h_m \omega \cos \omega t \cdot \pi [R^2 - (R - \lambda(t))^2] + \\ &+ n \mu_s \mu_0 \gamma h_m \omega \cos \omega t \cdot \pi \Delta L [2R + \Delta L], \quad (5) \end{aligned}$$

где n – число витков приемной катушки;

$$\mu_s = \frac{dB}{dH} \cdot \frac{1}{\mu_0} \text{ – магнитная проницаемость образца в сверхпроводящем состоянии;}$$

γ – коэффициент, характеризующий долю содержания сверхпроводящей фазы [5].

Последнее слагаемое в выражении (5) характеризует паразитный сигнал, возникающий в результате изменения магнитного поля в пространстве между поверхностью образца и витками измерительной катушки, который тем больше, чем больше зазор ΔL . Запишем амплитудное значение индуцируемого напряжения, введя обозначение $A = n \mu_0 \gamma \pi$ и

учитывая, что в нашем случае для воздуха или азота $\mu \approx 1$:

$$U_s = A \mu_s h_m \omega [R^2 - (R - \lambda(t))^2] + A h_m \omega \Delta L [2R + \Delta L]. \quad (6)$$

В переменных магнитных полях проницаемость μ_s , как указывалось, является комплексной величиной, т.е. $\mu_s = \mu^* = \mu' + i\mu''$. С учетом этого выражение (5) принимает вид

$$\begin{aligned} U_s &= A \mu' h_m \omega [R^2 - (R - \lambda(t))^2] + \\ &+ i A \mu'' h_m \omega [R^2 - (R - \lambda(t))^2] + \\ &+ A h_m \omega \Delta L [2R + \Delta L] \quad (7) \end{aligned}$$

Если образец находится в нормальном состоянии, то глубина скин-слоя на частоте переменного поля, в используемом нами диапазоне 100 Гц ÷ 10 кГц, значительно превышает радиус образца (скин-слой порядка 15 ÷ 5 мм), и в приемной катушке индуцируется максимальное по величине напряжение

$$U_s = A \mu' h_m \omega R^2 + i A \mu'' h_m \omega R^2 + A h_m \omega \Delta L [2R + \Delta L]. \quad (8)$$

При переходе образца в сверхпроводящее состояние во внешнем магнитном поле, равном нулю, сигнал минимален и практически равен паразитному сигналу $A h_m \omega \Delta L (2R + \Delta L)$. При измерениях для повышения чувствительности этот сигнал необходимо компенсировать. Для этих целей, как правило, используется часть сигнала, индуцируемого в компенсационной катушке, расположенной в переменном магнитном поле вдали от образца (рис. 1).

Рассмотрим процедуру компенсации в случае используемой нами синусоидальной модуляции магнитного поля. Паразитный сигнал, индуцируемый в приемной катушке, в общем случае оказывается сдвинутым по фазе на некоторый угол относительно сигнала в компенсационной катушке. В связи с этим компенсацию проводят путем вычитания этих сигналов, подбирая необходимую амплитуду компенсирующего сигнала с помощью блока компенсации. В наших экспериментах использование способа компенсации, основанного на получении нулевого сигнала от образца, находящегося в мейснеровском состоянии, затруднено одним обстоятельством. Из-за наличия в сверхпроводнике диссипации даже при очень малых амплитудах переменного поля паразитный сигнал не удается полностью скомпенсировать. В зависимости от типов образцов степень компенсации различалась, хотя и незначительно. В большинстве случаев ослабление паразитного сигнала было не менее 10^3 раз.

Будем считать, что паразитный сигнал полностью скомпенсирован. Тогда выражение (8) примет вид

$$U_s = A \mu' h_m \omega [R^2 - (R - \lambda(t))^2] + i A \mu'' h_m \omega [R^2 - (R - \lambda(t))^2] = U' + i U''. \quad (9)$$

$$U' = A\mu' h_m \omega [R^2 - (R - \lambda(t))^2], \quad (10)$$

$$U'' = A\mu'' h_m \omega [R^2 - (R - \lambda(t))^2].$$

Для выделения из полного сигнала $U_s(t)$ компонент, пропорциональных действительной и мнимой частям комплексной магнитной проницаемости, использовался метод синхронного детектирования, когда опорным является сигнал, либо находящийся в фазе с переменным полем $h(t)$, либо сдвинутый относительно последнего на $\pi/2$. В первом случае регистрируется сигнал, пропорциональный действительной части комплексной магнитной проницаемости μ' , характеризующий проникновение переменного поля в сверхпроводник. Во втором – сигнал, пропорциональный мнимой части проницаемости μ'' , пропорциональный величине диссипируемой энергии.

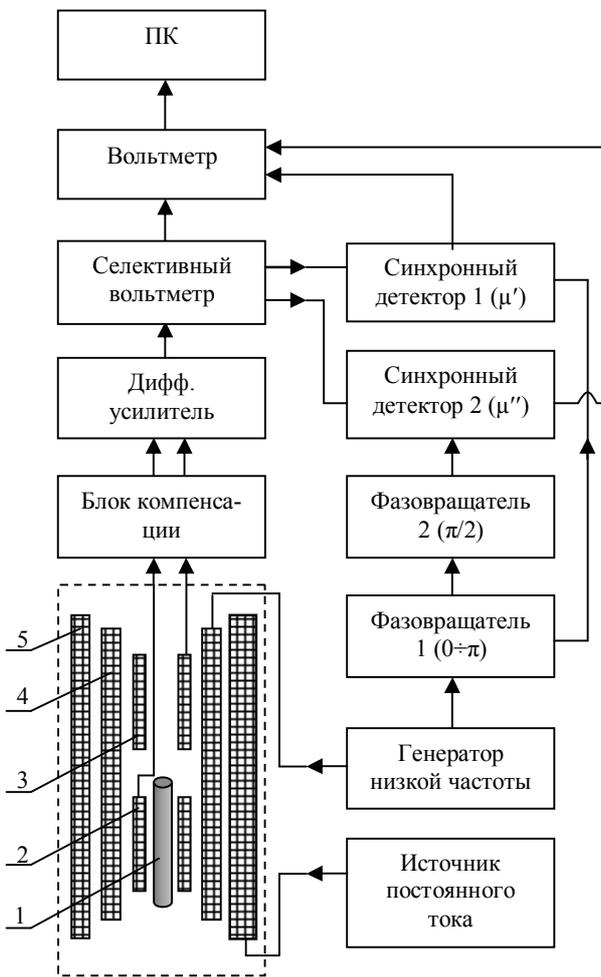


Рис. 1. Схема для измерения комплексной магнитной проницаемости сверхпроводников при 77 К: 1 – образец; 2 – измерительная катушка; 3 – компенсационная катушка; 4 – соленоид для создания переменного магнитного поля; 5 – соленоид для создания постоянного магнитного поля; 6 – несущая труба

Измеряя путем синхронного детектирования сигнал, возникающий при синфазном с переменным полем изменении магнитного потока, определяется величина напряжения, соответствующая действи-

тельной части U' выражения (10), а измеряя диссипативный сигнал, находится напряжение, соответствующее мнимой части U'' выражения (10). Нормировав полученные напряжения на соответствующее значение действительной части напряжения для сверхпроводника, находящегося в нормальном состоянии, получаем величины компонент комплексной магнитной проницаемости.

Модуль наводимого в измерительной катушке сигнала U_s определяется как

$$|U_s| = \sqrt{U'^2 + iU''^2}. \quad (11)$$

В экспериментах мнимая часть напряжения оказывается примерно в 10÷50 раз меньше действительной. В этой связи ею можно пренебречь (погрешность при этом составит не более 10 %). В итоге получаем, что величина первой гармоники U_1 приблизительно равна своей действительной части и может являться характеристикой проникновения переменного поля.

Измерительные зонды

При проведении исследований использовался зонд для проведения высокочувствительных измерений μ^* при температуре жидкого азота (рис. 2).

На исследуемый образец сверхпроводника 1 наматывается измерительная катушка 2 проводом ПЭЛ-0,05, содержащим 250 витков. На расстоянии 30 мм от измерительной катушки располагается компенсационная катушка 3 аналогичной конструкции. Обе катушки закрепляются в пазах, выполненных на несущем основании из плексигласа.

Взаимоиндуктивность катушек составляла порядка 2 мкГн, поэтому взаимным влиянием катушек в измерениях можно было пренебречь. Основание размещено внутри соленоида 4, создающего переменное измерительное поле, имеющего коэффициент 0,01 Тл/А. На держателе с катушкой надевается трубка из фторопласта 6 с внешним диаметром 30 мм, на которой закреплен соленоид для создания постоянного поля 5 с коэффициентом 0,19 Тл/А. Запитка соленоида 4 осуществлялась с помощью генератора низкой частоты (рис. 1), имеющего малый коэффициент нелинейных искажений, а ток через него контролировался амперметром переменного тока.

Соленоид 5 запитывался от источника постоянного тока, который после доработки позволял вводить и выводить магнитное поле со скоростью в пределах от 0,1 до 10 мТл/с.

При проведении исследований при температуре жидкого азота использовался сосуд Дьюара СДП-16. Для ослабления лабораторных магнитных полей и поля Земли сосуд размещался внутри двух цилиндрических экранов из пермаллоя 79НМ, обеспечивающих суммарный коэффициент ослабления перпендикулярной составляющей магнитного поля не менее 10^2 . Исследования проводились при переменном поле амплитудой $(0,01 \div 1,5) \cdot 10^{-4}$ Тл,

частотой $100 \text{ Гц} \div 10 \text{ кГц}$ и постоянным магнитным полем с напряженностью до $0,05 \text{ Тл}$.

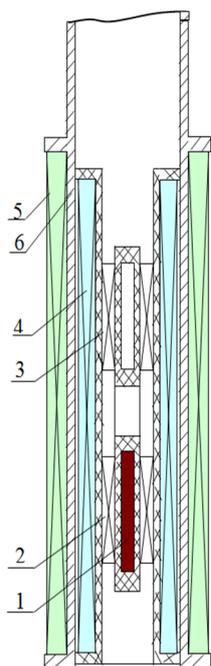


Рис. 2. Схема зонда для измерения комплексной магнитной проницаемости сверхпроводников при 77 К : 1 – образец; 2 – измерительная катушка; 3 – компенсационная катушка; 4 – соленоид для создания переменного магнитного поля; 5 – соленоид для создания постоянного магнитного поля; 6 – несущая труба

Измерительная схема

Напряжение с измерительной и компенсационной катушек подается на блок компенсации, затем на вход дифференциального усилителя, имеющего коэффициент усиления $10 \div 10^3$ (см. рис. 1). Сигнал, соответствующий первой гармонике измерительного поля, выделялся с помощью селективного микровольтметра. Сигналы, пропорциональных действительной и мнимой частям комплексной магнитной проницаемости, определялись с помощью одноканальных синхронных детекторов СД1 (μ') и СД2 (μ''), опорные напряжения которых сдвинуты по фазе на 90° . Сдвиг фаз между опорным и измерительным сигналом, поступающим на синхронный детектор СД1, устанавливался равным нулю путем подстройки фазы опорного сигнала фазовращателем 1. Сдвиг фаз на $\pi/2$ между опорным и измерительным сигналом, поступающим на синхронный детектор СД2, обеспечивался фазовращателем 2. В итоге на выходе СД1 получали сигнал, пропорциональный действительной части комплексной магнитной проницаемости μ' , а на выходе СД2 – сигнал, пропорциональный мнимой части проницаемости μ'' . Достигнутая в данном стенде чувствительность составляла несколько десятых долей микровольта на измерительной катушке при частоте измерительного магнитного поля 1 кГц . Далее с помощью интеграторов производилось преобразование эффективных значений

напряжений на выходах синхронных детекторов в постоянные напряжения, и в дальнейшем сигналы поступали на входы вольтметров В7-78/1. В случае измерения комплексной магнитной проницаемости на других гармониках (2-й, 3-й и т.д.) использовался режекторный фильтр, который ослаблял основную гармонику.

Для измерения сигнала, соответствующего μ' и μ'' , использовался один вольтметр (ВМ) В7-78/1. Возможность измерять несколько сигналов становится доступна в ВМ В7-78/1 после установки в него дополнительной платы – десятиканального сканера. Сканер представляет собой плату расширения, состоящую из десяти электрических входов, оснащенных механическими реле (рис. 3). При замыкании реле соответствующий ей канал подключается к измерительной схеме ВМ, в результате чего становится доступным измерение подведенного к каналу сигнала. Переключаясь между каналами последовательно или по заданному алгоритму ВМ измеряет все подключенные к сканеру сигналы. Таким образом, один ВМ В7-78/1 может заменить несколько измерительных приборов.



Рис. 3. Десятиканальный сканер для вольтметра В7-78/1

Следует отметить, что подключение к сканеру нескольких сигналов не вносит дополнительные погрешности в измерения. Схема, управляющая работой сканера, устроена таким образом, что в каждый момент времени к ВМ может быть подключен только один канал, соответствующая ему реле замыкается (исключением является измерение сопротивления по четырехпроводной схеме, в этом случае одновременно замыкаются два реле соответствующие каналу, по которому подается ток, и каналу, по которому измеряется напряжение). Остальные реле размыкаются, в результате чего оставшиеся каналы электрически изолируются от измерительной схемы ВМ, соответственно подведенные к ним сигналы не влияют на точность измерений.

Недостатком использования одного ВМ В7-78/1 вместо нескольких приборов является отсутствие возможности одновременного измерения всех подведенных к нему сигналов, что обусловлено применением механических реле для соединения каналов сканера с измерительной схемой ВМ. Процесс переключения между каналами, состоящий из размыкания всех реле и замыкания реле, соответствующего переключаемому каналу, занимает около 200 мкс , что и обуславливает задержку между изме-

рениями. Однако в рассматриваемой установке данный недостаток не является существенным, так как скорость изменения величины μ невысока.

Управление ВМ В7-78/1 осуществлялось специально разработанным программным обеспечением (ПО), представляющем собой универсальный самописец, не привязанный к конкретной методике измерений. ПО позволяет выполнять регистрацию величины сигналов для каждого из 10 каналов сканера и выводить значения в виде временных зависимостей. Перед началом регистрации производится настройка задействуемых каналов – задаются измеряемые величины (ток, напряжение, сопротивление), полиномы, по которым будут пересчитываться получаемые значения, временной интервал между двумя последовательными измерениями. Дальнейшая схема его работы представлена на рис. 4. После запуска ПО подает команды ВМ – настраивает каналы, инициирует измерение сигналов и считывает результат. Полученные значения пересчитываются с учетом полиномов и выводятся на экран в виде графиков сигнал(время) и в файл для последующей обработки. Далее цикл измерения повторяется.

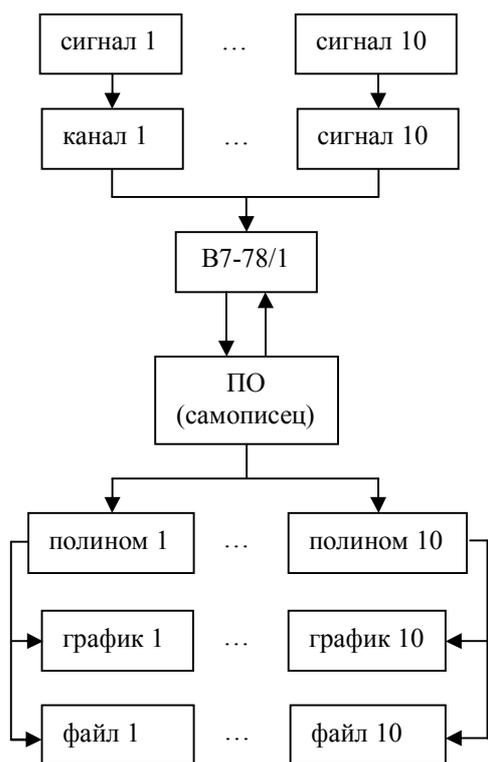
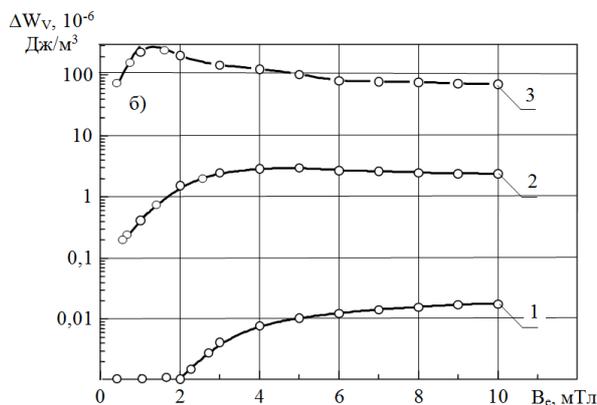
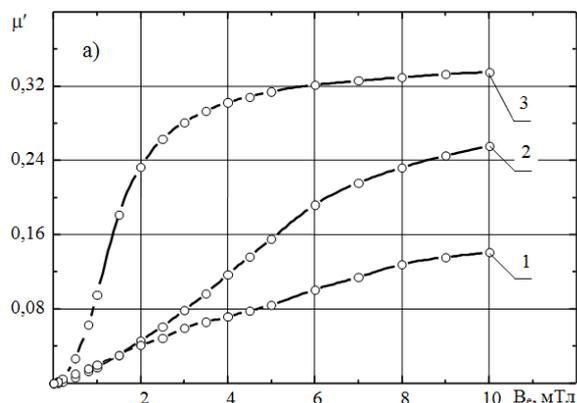


Рис. 4. Схема измерительного цикла программного обеспечения

Результаты измерений

В качестве примера рассмотрим результаты измерений комплексной магнитной проницаемости для образцов $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ в постоянных полях до 20 мТл при воздействии переменного измерительного поля с $b_m = 10^{-3} \div 10^{-1}$ мТл и $f_m = 100$ Гц \div 20 кГц. Целью эксперимента являлось определение влияния амплитуды и частоты переменного поля на μ^* .

Характерные результаты экспериментальных исследований полевой зависимости действительной части комплексной магнитной проницаемости сверхпроводников при различной амплитуде переменного измерительного поля b_m приведены на рис. 5 а. При малых амплитудах $b_m \sim 10^{-2}$ мТл переменное поле монотонно проникает в сверхпроводник (кривая 1 и 2, рис. 5 а), однако при $b_m > 10^{-2}$ мТл наблюдается заметный рост проникновения, который продолжается в постоянных полях до $2 \cdot 10^{-1}$ мТл, а затем кривая $\mu'(B_e)$ выходит в насыщение (кривая 3 рис. 5 а).



1 – $b_m = 10^{-3}$ мТл; 2 – 10^{-2} мТл; 3 – 0,1 мТл; $f_m = 1$ кГц

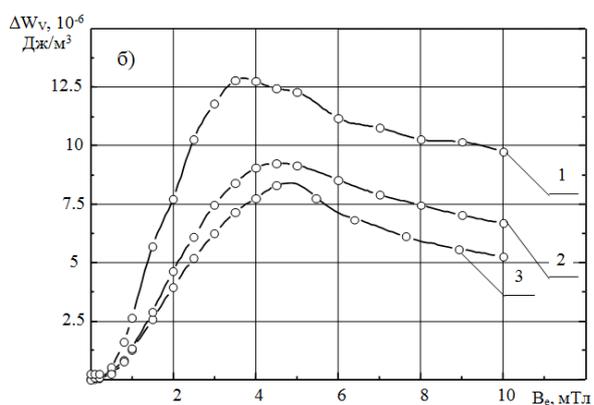
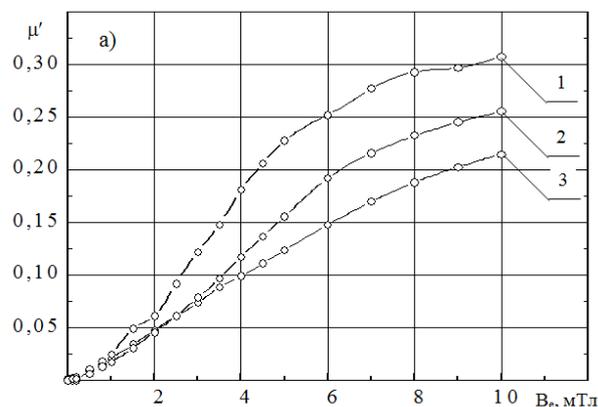
Рис. 5. Полевые зависимости действительной части комплексной магнитной проницаемости (а) и величины диссипации энергии (б) при различных амплитудах переменного поля

Величину диссипируемой энергии на единицу объема сверхпроводника ΔW_V за период можно определить по формуле [6]

$$\Delta W_V = \frac{1}{4\mu_0} b_m \mu'' \quad (12)$$

На зависимости $\Delta W_V(B_e)$ при $b_m > 10^{-3}$ мТл, как и на полевой зависимости μ' , наблюдается максимум. С ростом амплитуды измерительного переменного поля b_m его положение смещается в область меньших значений B_e . В поле, где наблюдается пик

ΔW_V , величина μ' приблизительно равна половине от ее максимального значения, измеряемого в эксперименте. Отметим, что в области малых значений B_e (до 1 мТл) и $b_m < 10^{-2}$ мТл величина действительной части комплексной проницаемости не зависит от амплитуды, а диссипация энергии практически равна нулю.



1— $f_m = 100$ Гц; 2— 1 кГц; 3— 10 кГц; $b_m = 10^{-2}$ мТл

Рис. 6. Полевые зависимости действительной части комплексной магнитной проницаемости (а) и величины диссипации энергии (б) при различных частотах f_m переменного поля

Влияние частоты переменного измерительного поля f_m при фиксированной амплитуде на действительную часть комплексной проницаемости и диссипацию энергии $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ показано на рис. 6. В малых полях B_e (до 1 мТл) изменение частоты практически не сказывается ни на потерях энергии переменного поля, ни на его проникновении. В больших постоянных магнитных полях с ростом частоты переменного поля величины μ' и ΔW_V уменьшаются.

Отметим, что аналогичное поведение потерь наблюдается и на сверхпроводниках других партий.

Заключение

Разработана экспериментальная автоматизированная установка для измерения величины комплексной магнитной проницаемости сверхпроводников при температуре 77 К. Установка позволяет выполнять измерения в постоянных магнитных полях напряженностью до 0,15 Тл и переменных магнитных полях напряженностью $10^{-4} \div 3 \cdot 10^{-1}$ мТл и частотой 100 Гц \div 100 кГц. Регистрация значений производится автоматически универсальным цифровым вольтметром В7-78/1, работающим под управлением специально разработанного программного обеспечения. Программное обеспечение управляет команды вольтметру, считывает результат и производит первичную обработку измеряемых значений.

Исследовано влияние амплитуды и частоты переменного магнитного поля на комплексную магнитную проницаемость высокотемпературных сверхпроводников $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$. Установлено, что при увеличении как амплитуды, так и частоты переменного магнитного поля значения μ' и μ'' возрастают, однако характер зависимостей $\mu'(B_e)$ и $\mu''(B_e)$ существенно различается.

Литература

1. Вонсовский С.В. Магнетизм [Текст] / С.В. Вонсовский. – М.: Наука, 1971. – 1032 с.
2. Нелинейные свойства гранул и межгранульной среды высокотемпературных сверхпроводников системы $BiSrCaCuO$ [Текст] / И.М. Голев, О.В. Калядин, В.Г. Каменский, А.В. Сергеев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. Т. 11. – №5. – С. 129 – 135.
3. Микроструктура и сверхпроводящие свойства механоактивированных высокотемпературных сверхпроводников $YBaCuO$ [Текст] / А.А. Вишнев, Л.Г. Мамсурова, К.С. Пигальский и др. // Сверхпроводимость: физ., химия, техн. – 1994. – Т.7. – № 4. – С.643 – 657.
4. Милошенко В.Е. Сверхпроводники в магнитных полях малой амплитуды [Текст] / В.Е. Милошенко, И.М. Шушлебин, И.М. Голев // Техн. электродинамика. – 1988. – №2. – С. 7 – 11.
5. Закосаренко В.М. Модуляционные методы измерения критических токов в жестких сверхпроводниках второго рода [Текст] / В.М. Закосаренко, Е.В. Каряев, В.И. Цebro // Труды физ. института АН СССР. – 1984. – Т. 150. – С. 127 – 140.
6. Голев И.М. Исследование нелинейных свойств высокотемпературных сверхпроводников в токовом состоянии [Текст] / В.П. Трифонов, В.Е. Милошенко, А.А. Воронов // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. Сер. Материаловедение. – 2000. – Вып.1.8. – С.72 – 74.

Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
Воронежский государственный технический университет

THE RESEARCH FACILITY FOR MEASURING OF COMPLEX MAGNETIC PERMEABILITY OF HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS

I.M. Golev, Grand PhD of Physical and mathematical sciences, Full Professor, Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin, Voronezh, Russia Federation, e-mail: imgolev@gmail.com

A.A. Grebennikov, PhD of Physical and mathematical sciences, Lecturer, Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin, Voronezh, Russia Federation, e-mail: anton18885@yandex.ru

A.V. Sergeev, Postgraduate, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia Federation, e-mail: sergeev-av@bk.ru

The research facility for measuring the real and imaginary parts of the complex magnetic permeability of the superconductors at 77 K has been created. Its work is based on the inductive method. Inductive method is based on register the magnetic flux density changes inside the superconductor by coils which placed within the scope of the two magnetic fields - constant and variable small amplitude. Research facility allows measurements in the permanent magnetic fields of 0,15 Tesla and alternating magnetic fields with the peak value of strength $10^{-4} \div 3 \cdot 10^{-1}$ mT and a frequency of 100 Hz to 100 kHz. The experimental data is automatically registering by universal digital voltmeter V7-78 / 1, which is controlled by specially designed software. The software reads data from V7-78/1, then implements its primary processing, and outputs results to the graphics and in the file. Experiments on samples of high-temperature superconductors $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$, made possible to determine the effect of the amplitude and frequency of the alternating magnetic field to the depth of its penetration into the sample and the amount of energy dissipated in this case. It was found that an increase of both amplitude and frequency of the alternating magnetic field leads to an increase in the real and imaginary parts of the complex magnetic permeability

Key words: research facility, superconductor, complex magnetic permeability, the inductive method

References

1. Vonsovskii S.V. Magnetism [Magnetism]. Moscow, Nauka, 1971. 1032 p.
2. Golev I.M., Kaljadin O.V. et al. Nelinejnye svojstva granul i mezhrgranul'noj sredy vysokotemperaturnyh sverhprovodnikov sistemy BiSrCaCuO [Nonlinear properties of the granules and intergranular system environment of high temperature superconductors] // Vestnik VSTU. 2015. №5. P.129-135.
3. Vishnev A.A., Mamsurova L.G. et al. Mikrostruktura i sverhprovodyashchie svojstva mekhanoaktivirovannyh vysokotemperaturnyh sverhprovodnikov YBaCuO [The microstructure and superconducting properties of mechanically activated high-temperature superconductors YBaCuO] // Sverhprovodimost': fizika, himiya, tekhnika, 1994. V.7. №4. P.643-657.
4. Miloshenko V.E., Shushlebin I.M., Golev I.M. Sverhprovodniki v magnitnyh polyah maloj amplitudy [Superconductors in magnetic fields of low amplitude] // Tekhnicheskaya ehlektrodinamika, 1988. №2. P.7-11.
5. Zakosarenko V.M., Karyayev E.V., Tsebro V.I. Modulyacionnye metody izmereniya kriticheskikh tokov v zhestkikh sverhprovodnikah vtorogo roda [Modulation methods of measuring the critical current in hard superconductors of the second kind] // Trudy Fiz. Institute of the USSR AS, 1984. V.150. P.127-140.
6. Golev I.M., Trifonov V.P., Miloshenko V.E., Voronov A.A. Issledovanie nelinejnyh svojstv vysokotemperaturnyh sverhprovodnikov v tokovom sostoyanii [Investigation of nonlinear properties of high-temperature superconductors in a state of katabatic] // Vestnik VSTU. 2000. V.1.8. P.72-74.

ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ РОСТА НИТЕВИДНОГО КРИСТАЛЛА, ЛИМИТИРУЕМОГО ГЕТЕРОГЕННОЙ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИЕЙ, ОТ СОСТАВА ГАЗОВОЙ ФАЗЫ ПРИ БОЛЬШИХ КОНЦЕНТРАЦИЯХ ТЕТРАХЛОРИДА КРЕМНИЯ

О.Д. Козенков, А.А. Щетинин, В.В. Горбунов, И.В. Сычев

Проведен анализ известных экспериментальных результатов по росту нитевидных кристаллов, который позволяет выделить в качестве стадии, определяющей их рост, диффузионные и химические процессы доставки кристаллизующегося вещества к границе раздела жидкость-газ. В ростовых системах, где выделение кристаллизующегося вещества сопровождается химическими превращениями, можно говорить об определяющей роли гетерогенной химической реакции выделения кристаллизующегося вещества в процессе роста нитевидного кристалла. Для нитевидных кристаллов кремния, выращенных в проточной хлоридно-водородной системе, установлена зависимость скорости роста от концентрации тетрахлорида кремния в газовой фазе. При небольших концентрациях тетрахлорида кремния экспериментальные данные согласуются с теоретической зависимостью, полученной в рамках модели роста нитевидного кристалла, лимитируемого гетерогенной химической реакцией. С ростом концентрации тетрахлорида кремния расхождение экспериментальной и теоретической кривых, растет, причем степень расхождения увеличивается. Для подачи тетрахлорида кремния в реактор использовался принцип барботирования водорода через жидкий SiCl_4 . Для расчета концентрации тетрахлорида кремния в газовой фазе при проведении эксперимента использовалась формула, не учитывающая изменение концентрации насыщенного пара SiCl_4 в процессе барботирования. Экспериментальные результаты объяснены учетом изменения концентрации тетрахлорида кремния в газовой фазе в испарителе. По мере увеличения потока водорода через барботер концентрация тетрахлорида кремния в испарителе и его температура уменьшаются. Учет понижения концентрации тетрахлорида кремния в парогазовой смеси позволяет получить удовлетворительное соответствие теоретических и экспериментальных результатов во всем диапазоне концентраций.

Ключевые слова: механизм роста пар-жидкость-кристалл, нитевидный кристалл, гетерогенная химическая реакция, концентрация, молярное отношение тетрахлорида кремния к водороду, барботер, скорость роста

Введение

Нитевидные кристаллы (НК), растущие по механизму пар-жидкость-кристалл (ПЖК), это – квазиодномерные, совершенные, бездислокационные, монокристаллические объекты, обладающие рядом уникальных свойств [1-6]. Наряду с практической значимостью они представляют определенный научный интерес как модельные объекты для изучения физико-химических процессов роста монокристаллов по ПЖК механизму [1,2,5,6]. Особый интерес к НК как к наноразмерным объектам возникает в связи с перспективами их применения в интенсивно развивающихся нанотехнологиях [5-7, 8]. Они могут быть использованы и уже используются в качестве армирующих элементов композиционных материалов. Особый интерес в этом смысле представляют углеродные нанотрубки, которые так же растут по механизму пар-жидкость-кристалл и в настоящее время уже получены длиной до 0,5 м [8].

Из экспериментальных данных о росте НК по механизму ПЖК известно:

- выделение кристаллизующегося вещества путем физического осаждения или протекания ге-

терогенной химической реакции происходит на поверхности жидкой фазы, скорость выделения кристаллизующегося вещества на боковой поверхности кристалла и в объеме газа мала [1];

- скорость роста НК зависит от площади поверхности жидкой фазы на его вершине [6,9];

- скорость роста НК определяется температурой, составом газовой фазы, скоростью потока газа, природой жидкой фазы на вершине НК [6,10-13];

- скорость роста НК зависит от его радиуса R . При $2,5-5 \text{ мкм} \leq R \leq 50 \text{ мкм}$ она обратно пропорциональна радиусу кристалла [14], а при $R < 2,5 \text{ мкм}$ обратно пропорциональна квадрату его радиуса [2];

- скорость роста НК зависит от плотности расположения кристаллов на подложке, причем по мере увеличения плотности она падает [15];

- вокруг растущего кристалла существует зона «питания», размеры которой линейно уменьшаются с уменьшением радиуса НК [6,15]. Так, для НК с $R = 30 \text{ мкм}$ радиус зоны «питания» составляет $\sim 500 \text{ мкм}$;

- при определенных составах газовой фазы наблюдается травление через жидкую фазу с образованием отрицательных кристаллов [16];

- НК растут конусными, то есть их диаметр уменьшается по мере увеличения длины [2,6,17,18]. Существует и обратная зависимость диаметра кристалла от его длины, например, радиальная периодическая неустойчивость [2].

Отмеченные экспериментальные закономерности характерны для различных способов получения НК и указывают на приоритет процессов, происходящих на границе раздела газ-жидкость при росте кристаллов.

Козенков Олег Дмитриевич – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: kozenkov_w@mail.ru

Щетинин Анатолий Антонович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: prokurovka@gmail.ru

Горбунов Валерий Викторович – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: valeris55@mail.ru

Сычев Игорь Валерьевич – ВИ МВД России, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: sychevaga@mail.ru

В работе [5] обстоятельно рассмотрен рост НК из молекулярных пучков в процессе физического осаждения. В предлагаемых моделях роста НК из молекулярных пучков рассматривались процессы диффузии в жидкой фазе, зародышеобразования на фронте кристаллизации, роль размерных эффектов, поверхностной диффузии. Теоретические модели достаточно хорошо описывают результаты эксперимента.

Наряду со способом получения НК из молекулярных пучков широко используются системы с химической реакцией [1,2,6,8]. Такие системы обладают высокой степенью управляемости и широко используются для получения микро- и наноразмерных кристаллов.

В работах [9,10,13,18] развивается модель роста НК, лимитируемого гетерогенной химической реакцией выделения кристаллизующегося вещества на границе газ-жидкость. Результаты, полученные в данных работах, дают хорошее согласование с известными экспериментальными данными.

В работе [9] была предложена модель роста НК, лимитируемого гетерогенной химической реакцией. В работе [10] на основе модели [9] рассмотрена зависимость скорости роста НК от состава газовой фазы. Теоретические зависимости, полученные в [10], дали удовлетворительное согласование с экспериментом. В настоящей работе, в рамках модели [9,10] проанализирована зависимость скорости роста НК от состава газовой фазы на примере кристаллов кремния, выращенных в проточной системе $\text{SiCl}_4 + \text{H}_2$ для больших концентраций тетрахлорида кремния в водороде.

Методика проведения эксперимента

НК кремния выращивались из газовой фазы в открытой проточной системе в процессе кристаллизации по ПЖК механизму. В качестве инициирующей рост примеси использовались медь и золото. Рост НК кремния проводился в печи радиационного нагрева «Изоприн» с горизонтальным расположением трубчатого реактора из кварца двойного переplava.

Водород получался путем электролиза водного раствора соли KCl , промывался в дистиллированной воде барботированием и подавался в систему осушки, которая имела следующие блоки: вымораживания воды, каталитической очистки от кислорода (хромоникелевый и палладиевый катализаторы), очистки сорбентами (силикагель, алюмогель, цеолит, активированный уголь), механический фильтр. Водород после очистки имел точку росы не выше 183 К.

Для подачи и дозирования газов использовалась система разводки, которая включала фторопластовые вентили, ротаметры типа НДЕМ 002, 003 и соединительные линии, выполненные из фторопластовых труб. Подача тетрахлорида кремния в реактор производилась путем барботирования во-

дорода через жидкий SiCl_4 с помощью барботера конструкция которого представлена на рис. 1. Процесс испарения тетрахлорида кремния в барботере приводит к понижению температуры жидкости, что сказывается на величине потока испарения. Для получения воспроизводимых результатов барботер термостатировался.

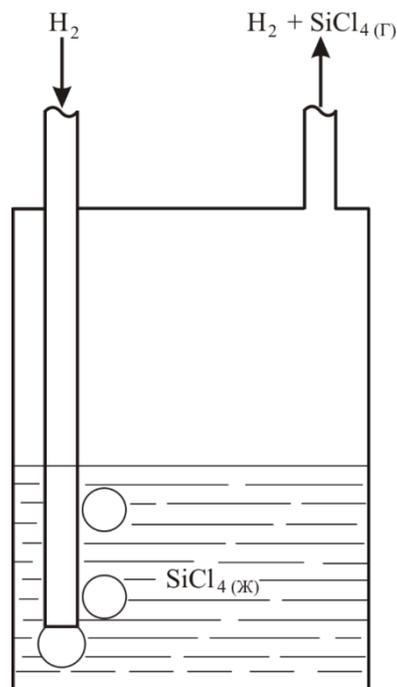


Рис. 1. Схема барботера, обеспечивающего создание газовой смеси $\text{SiCl}_4 + \text{H}_2$

В качестве характеристики концентрации тетрахлорида кремния в водороде использовалось мольное отношение реагентов в газовой фазе

$$n = \frac{M_{\text{SiCl}_4}}{M_{\text{H}_2}}, \quad (1)$$

где M_{SiCl_4} – молярный поток тетрахлорида кремния, M_{H_2} – молярный поток водорода.

Расчет мольного отношения проводился по формуле:

$$n = \frac{V_{\text{SiCl}_4} \cdot \rho \cdot 22,4}{M_{\text{SiCl}_4} (V_{\text{H}_2} + V_{\text{SiCl}_4})}, \quad (2)$$

где V_{SiCl_4} – объем водорода, прошедшего через барботер в единицу времени, V_{H_2} – объем водорода, прошедшего в реактор помимо барботера в единицу времени, M_{SiCl_4} – молярная масса тетрахлорида кремния, ρ – плотность насыщенного пара тетрахлорида кремния при данной температуре.

Данная методика определения концентрации проста и удобна [19], хотя содержит определенные допущения.

Для определения скорости роста НК использовалась методика «меток времени» [2], заключающаяся в незначительном изменении температуры

роста с целью получения на НК видимого изменения диаметра.

Измерения геометрических размеров НК проводилось с помощью оптического металлографического микроскопа. Более детальное изучение НК проводилось с помощью электронного растрового микроскопа.

Результаты и их обсуждение

Известно [10], что скорость роста НК кремния с увеличением концентрации SiCl_4 в водороде сначала возрастает, достигая максимума, а затем падает до нуля и сменяется травлением. Подобного рода зависимости характерны для кристаллов, получаемых в системах где выделение кристаллизующего

вещества сопровождается обратимой гетерогенной химической реакцией. Характерный вид зависимости скорости роста НК от мольного отношения реагентов в газовой фазе представлен на рис. 1.

Данные термодинамического анализа системы $\text{SiCl}_4 + \text{H}_2$ [10] указывают на то, что основными компонентами газовой фазы являются H_2 , HCl , а из кремний содержащих компонентов SiCl_2 . Так, в зависимости от мольного отношения компонентов n начиная с температуры 1223 К концентрация SiCl_2 становилась выше концентраций прочих кремнийсодержащих компонентов и продолжала расти с повышением температуры. Концентрации кремнийсодержащих компонентов, наиболее близких к концентрации SiCl_2 , напротив, уменьшались с ростом температуры.

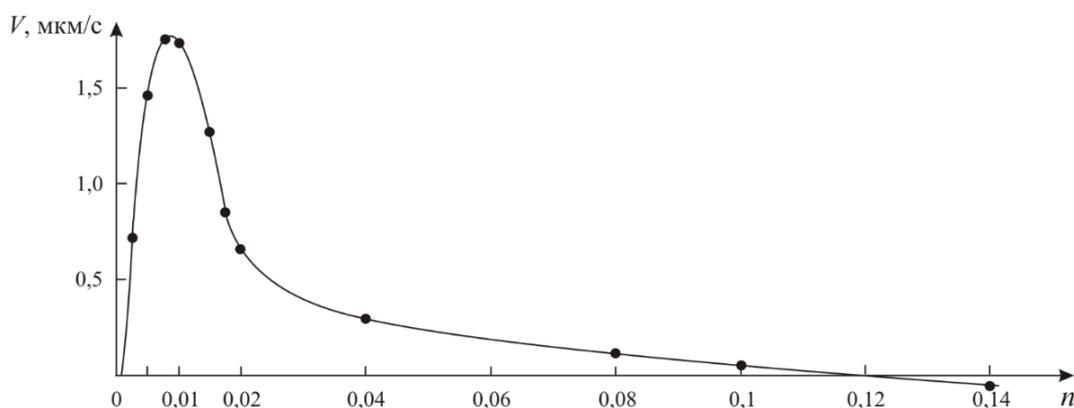
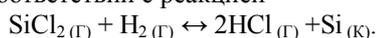


Рис. 2. Зависимость скорости роста НК кремния выращенного с использованием меди в качестве иницирующей ПЖК рост примеси при $T = 1323 \text{ K}$

Основываясь на результатах термодинамического анализа системы $\text{SiCl}_4 + \text{H}_2$, будем считать, что выделение кремния в процессе роста НК происходит в соответствии с реакцией



Это схема химической реакции. Все остальные кремний содержащие компоненты также могут принимать участие в процессе роста НК.

Будем считать, что концентрация SiCl_2 включает в себя все кремнийсодержащие компоненты. Для этого случая можно рассчитать концентрации H_2 , SiCl_2 , HCl при мольном отношении реагентов (1) в исходной газовой фазе равном n . Согласно [10] соответствующие концентрации компонентов могут быть определены следующим образом:

$$\begin{aligned} C_{\text{H}_2} &= \frac{1-n}{2n+1}C \\ C_{\text{SiCl}_2} &= \frac{n}{2n+1}C \\ C_{\text{HCl}} &= \frac{2n}{2n+1}C. \end{aligned} \quad (3)$$

Где C_{H_2} , C_{SiCl_2} , C_{HCl} – соответствующие концентрации компонентов в газовой фазе, C – общая концентрация газовой смеси.

В [9] была предложена модель роста нитевидного кристалла, лимитируемого гетерогенной химической реакцией на поверхности жидкой фазы.

Выражение для скорости роста НК, полученное в рамках этой модели записывается в виде:

$$V = \frac{2\Omega D_1}{aR\sqrt{2\alpha}} \left[\left(\frac{\sqrt{2\alpha} D_1}{R\Delta R} + d \right) \pm \sqrt{\left(\frac{\sqrt{2\alpha} D_1}{R\Delta R} + d \right)^2 - 4ac} \right]. \quad (4)$$

Где V – скорость роста НК, Ω – объем атома кристаллизующегося вещества, D_1 , D_2 , D_3 – коэффициенты диффузии компонентов SiCl_2 , H_2 , и HCl соответственно, R – радиус нитевидного кристалла, $\alpha = 1 + \cos\theta_k$, θ_k – контактный угол между торцом НК и касательной к поверхности жидкой фазы в тройной точке, ΔR – толщина слоя у поверхности жидкой фазы в котором, концентрации компонентов постоянны для заданных условий роста.

При записи (11) использованы обозначения:

$$\begin{aligned}
 a &= \left(k_1 \frac{D_1}{D_2} - 4k_2 \frac{D_1^2}{D_3^2} \right) \\
 b &= \frac{\sqrt{2\alpha} D_1}{R_{\text{НК}} \Delta R} + d \\
 d &= 4k_2 C_{03} \frac{D_1}{D_3} + k_1 \left(C_{01} \frac{D_1}{D_2} + C_{02} \right) \\
 c &= k_1 C_{01} C_{02} - k_2 C_{03}^2.
 \end{aligned} \quad (5)$$

Где k_1, k_2 – константы скорости прямой и обратной реакции выделения кристаллизующегося вещества, C_{01}, C_{02}, C_{03} – концентрации компонентов $\text{SiCl}_2, \text{H}_2$, и HCl в объеме газовой фазы соответственно.

Если учесть в выражении (4) для скорости роста НК константы (5) и значения концентраций компонентов в газовой фазе (3), то для фиксированного радиуса кристалла можно получить зависимость скорости роста НК от мольного отношения n .

На рис. 3 приведены расчетные зависимости скорости роста НК от мольного отношения n в сравнении с экспериментальными данными. Расчетные кривые были получены подбором значений констант скоростей прямой и обратной реакции, при которых положение максимума кривой и максимальная скорость роста НК в наибольшей степени соответствовали эксперименту с учетом температурной зависимости концентрации газовой фазы.

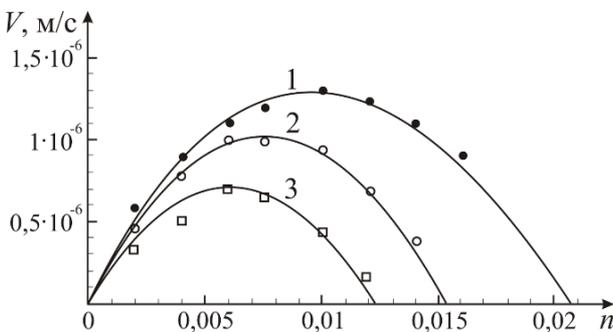


Рис. 3. Зависимость скорости роста НК от мольного отношения реагентов n . Точками обозначены соответствующие экспериментальные значения. 1 – $T = 1298 \text{ K}$; 2 – $T = 1323 \text{ K}$; 3 – $T = 1348 \text{ K}$

Как видно из рис. 3, имеется удовлетворительное согласование экспериментальных данных и расчетных результатов.

Однако, как следует из рис. 2, начиная с $n > 0,02$ вид экспериментальной кривой резко отличается от расчетной зависимости рис. 3. При мольных отношениях $n > 0,02$ скорость роста медленно падает с ростом мольного отношения, плавно стремясь к нулю, и переходит в область травления.

Нетрудно видеть, что расчетная формула (2) для определения исходного мольного отношения реагентов n получена при условии вытеснения водородом соответствующего объема газовой смеси тетрахлорида кремния и водорода из барботера.

Такое допущение оправдано для малых потоков водорода, проходящих через барботер. При прохождении водорода через барботер, концентрация водорода в газовой смеси тем больше, чем больше его поток.

Для оценки влияния величины потока водорода, проходящего через барботер, на состав газа, выходящего из него, предположим, что плотность потока испарения с поверхности жидкого тетрахлорида кремния в барботере определяется как плотность потока частиц j_n , создающих давление насыщенного пара над поверхностью вещества:

$$j_n = \frac{C_n}{4} \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}}. \quad (6)$$

Где C_n – концентрация (число частиц в единице объема) насыщенного пара, T – абсолютная температура, k_B – постоянная Больцмана, m – масса частицы.

Для барботера с круглым поперечным сечением радиуса r (рис. 1), в отсутствии потока водорода через барботер, поток испарения тетрахлорида кремния J_n равен потоку конденсации и записывается в виде:

$$J_n = \frac{\pi r^2 C_n}{4} \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}}. \quad (7)$$

Как следует из (7), поток испарения зависит от площади поверхности жидкой фазы и с ростом поперечного размера барботера поток испарения растет.

Давление насыщенного пара тетрахлорида кремния в мм рт. ст. может быть определено в соответствии с [20] в виде:

$$\lg P_n = -\frac{1572}{T} + 7,64. \quad (8)$$

Где P_n – давление насыщенного пара тетрахлорида кремния при температуре T .

Поток испарения возникает в результате продувки барботера водородом при условии, что концентрация пара меньше концентрации насыщенного пара. Пусть C – концентрация пара над поверхностью жидкого тетрахлорида кремния в барботере, тогда поток испарения можно записать в виде разности потока испарения насыщенного пара и потока конденсации пара с концентрацией C :

$$J_n = \frac{\pi r^2 (C_n - C)}{4} \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}}. \quad (9)$$

Поток тетрахлорида кремния J_y , который уносится водородом, проходящим через барботер, можно записать в виде:

$$J_y = C V_{\text{SiCl}_4}. \quad (10)$$

В стационарном случае приравняв потоки (9) и (10) найдем выражение для концентрации пара тетрахлорида кремния в барботере:

$$\frac{C}{C_n} = \frac{\pi r^2 \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}}}{V_{\text{SiCl}_4} + \pi r^2 \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}}}. \quad (11)$$

Оценки относительной концентрации (11) показали, что для потоков водорода, проходящего через барботер, используемых в эксперименте (рис. 2), концентрация C практически не отличается от концентрации C_n . Существенное расхождение между концентрациями C и C_n начинается с потоков водорода в ~ 100 л/час.

Существует еще одна причина понижения концентрации тетрахлорида кремния в парогазовой смеси, выходящей из барботера – это зависимость давления насыщенного пара от температуры.

Для оценки температуры жидкого тетрахлорида кремния в барботере при некотором потоке водорода через него воспользуемся следующей моделью. Будем считать, что температура во всем объеме жидкого тетрахлорида кремния в барботере одинакова, так как при продувке водорода происходит перемешивания жидкости пузырьками газа. Испарение тетрахлорида кремния создает тепловой поток Q_y , связанный с потоком (10):

$$Q_y = \eta C V_{\text{SiCl}_4}. \quad (12)$$

Где η – теплота испарения тетрахлорида кремния в расчете на атом.

Будем считать, что для термостатируемого барботера температура на его внешних границах постоянна, тогда тепловой поток, приходящий в жидкий тетрахлорид кремния Q_n через стенки барботера запишется в виде:

$$Q_n = -\lambda \frac{\Delta T}{x} S. \quad (13)$$

Где λ – коэффициент теплопроводности стенок барботера (кварц), ΔT – понижение температуры тетрахлорида кремния в барботере относительно температуры в термостате, x – толщина стенок барботера, S – площадь поверхности теплопередачи.

В стационарных условиях потоки (12) и (13) равны, откуда следует выражение для величины падения температуры тетрахлорида кремния:

$$\Delta T = \frac{x \eta C V_{\text{SiCl}_4}}{\lambda S}. \quad (14)$$

Оценка температуры тетрахлорида кремния в барботере для $x = 2 \cdot 10^{-3}$ м, $V_{\text{H}_2} = 80$ л/час, $n = 0,01$, $S = 2 \cdot 10^{-3}$ м², $T = 293$ К, $\eta = 28,9$ кДж/моль, $\lambda = 1,36$ Вт м⁻¹ К⁻¹ [20] дает величину $\Delta T \sim 0,2$ К.

Понижение температуры тетрахлорида кремния существенно понижает концентрацию насыщенного пара (8).

Величина понижения температуры тетрахлорида кремния в барботере определяется условиями теплоотвода и интенсивностью процесса испарения. Нами рассматривался идеализированный вариант, который реализуется при интенсивном перемешивании охлаждающей среды термостата. Если это перемешивание отсутствует или отсутствует термостатирование барботера, то температуры тетрахлорида кремния может повышаться от единиц до десятка градусов.

В эксперименте следует учитывать и измене-

ние концентрации тетрахлорида кремния в водороде в процессе испарения, и его температуру. Кроме того, можно использовать барботер из материалов с высокой теплопроводностью и большой поверхностью теплообмена, что во многом снимет возникающие проблемы.

Учет изменения состава парогазовой смеси в барботере в зависимости от потока водорода через него приведет в качественное соответствие с экспериментом расчетные значения скорости роста НК в зависимости от состава газовой фазы (3), (4), (5). Полное количественное соответствие может быть достигнуто надежным определением состава газовой фазы.

Заклучение и выводы

В работе рассмотрены возможные причины отклонения расчетной зависимости скорости роста НК кремния от экспериментальных значений при достаточно больших мольных отношениях исходных компонентов в газовой фазе.

Экспериментально установлено, что начиная с $n > 0,02$ экспериментальная зависимость скорости роста НК кремния от n идет существенно выше расчетной, причем степень расхождения нарастает по мере роста мольного отношения n .

Если считать модель роста НК, лимитируемого гетерогенной химической реакцией выделения кристаллизующегося вещества адекватной, то причиной расхождения расчетных и экспериментальных результатов может быть неточное определение мольного отношения реагентов.

При определении n необходимо учитывать влияние величины потока водорода, проходящего через барботер и понижение температуры тетрахлорида кремния в барботере, на состав газовой фазы.

Проведены численные оценки влияния этих факторов и установлено:

- влияние величины потока водорода, проходящего через барботер, становится существенным начиная с ~ 100 л/час;

- влияние понижения температуры тетрахлорида кремния в барботере, на состав газовой фазы определяется конструкцией барботера, теплофизическими характеристиками материала, из которого он изготовлен, и условиями теплопередачи. Величина понижения температуры тетрахлорида кремния в барботере может достигать 10 К, что соответствует снижению концентрации насыщенного пара на порядок.

Учет понижения концентрации пара тетрахлорида кремния позволяет качественно объяснить экспериментальные результаты и подтверждает модель роста НК, лимитируемого гетерогенной химической реакцией.

Литература

1. Вагнер, Р. Монокристалльные волокна и армированные ими материалы [Текст] / Р. Вагнер; под ред. А.Т. Туманова. – М.: Мир, 1973. – 464 с.

2. Гиваргизов, Е.И. Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара [Текст] / Е.И. Гиваргизов. - М.: Наука, 1977. - 304 с.
3. Антипов, С.А. Релаксационные явления в нитевидных кристаллах полупроводников [Текст] / С.А. Антипов, А.И. Дрожжин, А.М. Рошупкин. - Воронеж: ВГУ. - 1987. 192 с.
4. Дрожжин, А.И. Преобразователи на нитевидных кристаллах P-Si <111> [Текст] / А.И. Дрожжин. - Воронеж, 1984. - 241 с. Деп в ВИНТИ 29 июня 1984. № 6606-84 Деп.
5. Дубровский, В.Г. Полупроводниковые нитевидные нанокристаллы: синтез, свойства, применения [Текст] / В.Г. Дубровский, Г.Э. Цырлин, В.М. Устинов // Физика и техника полупроводников. - 2009. - Т.43. - Вып. 12. - С. 1585-1628.
6. Небольсин, В.А. Рост нитевидных кристаллов [Текст] / В.А. Небольсин, А.А. Щетинин. - Воронеж: ВГТУ, 2003. - 620 с.
7. Spinelli, P. et al. Broadband omnidirectional antireflection coating based on subwavelength surface Mie resonators. Nat. Commun. 3:692 doi: 10.1038/ncomms1691 (2012).
8. Zhang R., Zhang Y, Zhang Q et al. // ACS Nano, 2013, vol. 7, № 7, p. 6156–6161.
9. Козенков О.Д. Модель роста нитевидного кристалла, лимитируемого гетерогенной химической реакцией [Текст] / О.Д. Козенков // Неорганические материалы. - 2014. - Т. 50. - № 11. - С. 1-5.
10. Козенков, О.Д. Зависимость скорости роста нитевидного кристалла, лимитируемого гетерогенной химической реакцией, от состава газовой фазы [Текст] / О.Д. Козенков, Л.Г. Косырева // Неорганические материалы. - 2015. - Т. 51. - № 11. - С. 1255-1259.
11. Щетинин, А.А. Влияние природы примеси на скорость аксиального роста нитевидных кристаллов кремния в открытой системе Si-H-Cl [Текст] / А.А. Щетинин, Л.И. Бубнов, О.Д. Козенков // Неорганические материалы. - 1987. - Т. 23. - № 10. - С. 1589–1592.
12. Небольсин, В.А. Влияние дисперсности частиц металла-катализатора на рост нитевидных кристаллов кремния / В.А. Небольсин, Е.В. Иевлева, С.С. Шмакова // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2012. - Т. 8. - № 7.2. - С. 16-19.
13. Козенков, О.Д. Модель теплового баланса бесконечно длинного нитевидного кристалла [Текст] / О.Д. Козенков, В.В. Горбунов // Неорганические материалы. - 2015. - Т.51. - № 5. - С.576-580.
14. Даринский, Б.М. О зависимости скорости роста нитевидных кристаллов от их диаметра [Текст] / Б.М. Даринский, О.Д. Козенков, А.А. Щетинин // Известия вузов. Сер. Физика. - 1986. - Т. 32.- № 12. - С. 18-22.
15. Щетинин, А.А. О зонах питания нитевидных кристаллов кремния растущих из газовой фазы [Текст] / А.А. Щетинин, О.Д. Козенков, В.А. Небольсин // Известия вузов. Сер. Физика. -1989. - Т. 32. - № 6. - С. 115-116.
16. Щетинин, А.А. О травлении монокристаллов кремния через жидкую фазу и образовании систем обычных и «отрицательных» нитевидных кристаллов [Текст] / А.А. Щетинин, А.И. Дунаев, О.Д. Козенков. - Воронеж. политехн. ин-т. 1981. Деп. в ВИНТИ. 8.12.81. № 5596-81. 9 с.
17. Козенков, О.Д. О конусности нитевидных кристаллов кремния [Текст] / О.Д. Козенков, А.Б. Козьяков, А.А. Щетинин // Известия вузов. Сер. Физика. - 1986. - Т. 29. - № 9. - С. 115-117.
18. Козенков, О.Д. Конусность нитевидного кристалла, обусловленная гетерогенной химической реакцией [Текст] / О.Д. Козенков // Неорганические материалы. 2016. том 52, № 3. С. 279–284.
19. Барил, М.А. Газовые системы оборудования и производства полупроводниковых приборов и интегральных схем [Текст] / М.А. Барил, В.К. Самойликов. - М.: Энергия. -1978. - 112 с.
20. Смитлз, К. Дж. Металлы [Текст]: справ. изд. / К. Дж. Смитлз, 1980. - 447 с.

Воронежский государственный технический университет
Воронежский институт МВД России

DEPENDENCE OF THE RATE OF WHISKER GROWTH, LIMITED TYPE OF HETEROGENEOUS CHEMICAL REACTIONS, THE COMPOSITION OF THE GAS PHASE AT A GREATER CONCENTRATION OF SILICON TETRACHLORIDE

O.D. Kozenkov, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kozenkov_w@mail.ru

A.A. Shetinin, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Full Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: prokurorovka@gmail.ru

V.V. Gorbunov, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: valeris55@mail.ru

I.V. Sychev, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Voronezh Institute of Russian Ministry of Internal Affairs, Voronezh, Russian Federation, e-mail: sychevaga@mail.ru

An analysis of the known experimental results on the growth of whiskers allows you to select as a defining stage of their growth, diffusion and chemical processes deliver the crystallizing substance to the liquid-gas interface. The growth system where the allocation of the crystallizing substance is accompanied by chemical transformations, we can talk about the decisive role of heterogeneous chemical reactions release crystallizing substance in the process of growth of a whisker. For silicon whiskers grown in flowing hydrogen chloride system, the dependence of the growth rate of silicon tetrachloride concentration in the gas phase. At low concentrations of silicon tetrachloride, experimental data agree with the theoretical dependence obtained in the model of whisker growth-limited heterogeneous chemical reaction. With increasing concentration of silicon tetrachloride discrepancy between the experimental and theoretical curves increasing with the degree of divergence increases. To

apply silicon tetrachloride in the reactor was used the principle of bubbling hydrogen through the liquid SiCl_4 . To calculate the concentration of silicon tetrachloride in the gas phase during the experiment used a formula, which takes into account, not change the concentration of SiCl_4 saturated steam during the bubbling. The experimental results are explained the changes in the concentration of silicon tetrachloride in the gas phase in the evaporator. As the flow of hydrogen through silicon tetrachloride borbater concentration in an evaporator, and its temperature decreases. Allowance for reduction of silicon tetrachloride concentration in the gas mixture provides a satisfactory agreement between theoretical and experimental results in the whole concentration range.

Key words: mechanism of vapor-liquid-solid growth, whisker, a heterogeneous chemical reaction, the concentration, the molar ratio of silicon tetrachloride to hydrogen, borbater, growth rate

References

1. Wagner R. Monokristal'nye volokna i armirovannye imi materialy [Monocrystalline fiber reinforced materials and their] ed. A.T. Tumanov. Moscow, Mir, 1973. 464 p.
2. Givargizov E.I. Rost nitevidnykh i platinchatykh kristallov iz para [The growth of whiskers and a pair of plate-like crystals] Moscow, Nauka, 1977. 304 p.
3. Antipov S.A., Drozhzhin A.I., Roshupkin A.M. Relaksatsionnye yavleniya v nitevidnykh kristallakh poluprovodnikov [Relaxation phenomena in whiskers of semi-conductors] Voronezh, VSU, 1987. 192 p.
4. Drozhzhin A.I. Preobrazovateli na nitevidnykh kristallakh P-Si <111> [Converters on whiskers P-Si <111>] Voronezh, VINITI 29.6.84. № 6606-84 Dep. 1984. 241 p.
5. Dubrovsky V.G. Poluprovodnikovye nitevidnye nanokristally: sintez, svoystva, primeneniya [Semiconductor nano-whisker crystals: synthesis, properties, applications] Semiconductor Physics and Technology. 2009.43. Vol. 12. P. 1585-1628.
6. Nebolsin V.A., Schetinin A.A. Rost nitevidnykh kristallov [The growth of whiskers] Voronezh. VSTU. 2003. 620 p.
7. Spinelli, P. Broadband omnidirectional antireflection coating based on subwavelength surface Mie resonators. Nat. Commun. 3:692 doi: 10.1038/ncomms1691. 2012.
8. Zhang R., Zhang Y., Zhang Q. ACS Nano, 2013, 7, № 7, p. 6156–6161.
9. Kozenkov O. D. A Model for Whisker Growth Limited by a Heterogeneous Chemical Reaction. Inorganic Materials, 2014, 50, 11, p. 1146–1150.
10. Kozenkov O. D., Kosyreva L. G. Effect of Vapor Phase Composition on the Whisker Growth Rate Limited by a Heterogeneous Chemical Reaction. Inorganic Materials, 2015, 51, 11, p. 1163–1167.
11. Shetinin A.A., Bubnov L.I., Kozenkov O. D. Vliyanie prirody primesi na skorost' aksial'nogo rosta nitevidnykh kristallov kremniya v otkrytoy sisteme Si-H-Cl [Influence of the nature of the impurity on the rate of silicon whiskers axonal growth in an open system Si-H-Cl] Inorganic Materials, 1987, 23, 10, p. 1589–1592.
12. Nebolsin V.A., Ievleva E.V., Shmakov S.S. Vliyanie dispersnosti chastits metalla-katalizatora na rost nitevidnykh kristallov kremniya [Influence of dispersed metal particles, catalysts on whisker growth SILICON] // Journal of VSTU, 2012, 8, 7-2, p. 16-19.
13. Kozenkov O. D., Gorbunov V. V. A Model for the Heat Balance of an Infinitely Long Whisker. Inorganic Materials, 2015, 51, 5, p. 520–524.
14. Darinskii B.M., Kozenkov O.D., Schetinin A.A. O zavisimosti skorosti rosta nitevidnykh kristallov ot ikh diametra [On the dependence of the rate of growth of whiskers on their diameter] Proceedings of the universities, Physics. 1986, 32, 12. p. 18-22.
15. Schetinin A.A., Kozenkov O. D., Nebolsin V.A. O zonah pitaniya nitevidnykh kristallov kremniya, rastushhih iz gazovoy fazy [Zones silicon whiskers supply from the gas phase growing] Proceedings of the universities, Physics. 1989, 32, 6. p. 115-116.
16. Schetinin A.A., Dunaev A.I., Kozenkov O. D. O travlenii monokristallov kremniya cherez zhidkuju fazu i obrazovanii sistem obychnykh i «otricatel'nykh» nitevidnykh kristallov [About etching single-crystal silicon through the liquid phase, and education systems of conventional and "negative" whiskers] Voronezh, VINITI 8.12.81. № 5596-81 Dep. 1981. 9 p.
17. Kozenkov O. D., Koziakov A.B., Schetinin A.A. O konusnosti nitevidnykh kristallov kremniya [About taper silicon whiskers] Proceedings of the universities, Physics. 1986, 29, 9. p. 115-117.
18. Kozenkov O. D. Konusnost' nitevidnogo kristalla, obuslovlennaja geterogennoj himicheskoj reakciej [Whisker Taper Induced by Heterogeneous Chemical Reaction]. Inorganic Materials, 2016, 52, 3, p. 279–284.
19. Baril M.A. Gazovye sistemy oborudovaniya i proizvodstva poluprovodnikovykh priborov i integral'nykh shem [The gas system equipment and production of semiconductor devices and integrated circuits] Moscow, Energy, 1978. 112 p.
20. Smitlz C.J. Metally [Metals]. Ref. ed, 1980. 447 p.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕОХЛАЖДЕНИЯ КРИОГЕННЫХ ЖИДКОСТЕЙ

А.А. Гребенников, О.В. Калядин, А.В. Сергеев, О.П. Свиридов,
И.М. Голев, С.А. Курьянов

В статье рассмотрены промышленные методы переохлаждения криогенных жидкостей. Разработана математическая модель процесса переохлаждения криогенных жидкостей в емкостях при вакуумировании парового пространства эжектором. Полученная система уравнений описывает теплофизические процессы, протекающие при переохлаждении криогенной жидкости, позволяя получить значения массы жидкости, давления, температуры жидкой фазы, а также давление и температуру газовой фазы для выбранного момента времени. Для выполнения автоматизированных вычислений на основе модели был разработан алгоритм, позволяющий по заданным начальным условиям вычислить параметры криогенной жидкости в каждый момент времени процесса эжектирования с некоторой заданной точностью. Предложенный алгоритм был использован для написания программного обеспечения, наглядно отображающего результаты в виде таблиц и графиков. Приведены временные зависимости температуры, давления, массы жидкого кислорода при переохлаждении в криогенной емкости, полученные с помощью разработанной модели. При проверке применимости разработанной модели к определению параметров процесса эжектирования полученные с помощью модели зависимости были сопоставлены с экспериментальными, полученными при переохлаждении жидкого кислорода на испытательном стенде АО ИК КБХА. Установлено, что результаты расчета имеют хорошую сходимость с экспериментом

Ключевые слова: эжектирование, криоагент, моделирование, алгоритм

Введение

При производстве криогенного вещества, его параметры (давление, температура) находятся на линии насыщения, когда определенному значению давления соответствует определенное значение температуры. В то же время часто появляется необходимость, чтобы температура криогенного вещества была ниже температуры, полученной в ходе производства. Также, бывают ситуации, когда в результате хранения температура криогенного вещества поднимается выше заданной.

Часто низкие температуры криогенного вещества требуются для обеспечения однофазного течения продукта по трубопроводам большой протяженности, а также для увеличения длительности бездренажного хранения. Во всех приведенных случаях требуется произвести охлаждение криогенного вещества в емкости хранилища с целью уменьшения его температуры до заданной.

Существует несколько промышленных способов понижения температуры криогенного вещества [1]:

- 1) с помощью холодильных установок;
- 2) с использованием продуктов, имеющих более низкую температуру;
- 3) с помощью испарения жидкости путем вакуумирования парового пространства сосудов.

Наиболее эффективный способ охлаждения это охлаждение с помощью вакуумирования парового пространства емкости хранилища. Этот способ позволяет получить вещество с любой температурой вплоть до твердого состояния. Это наиболее универсальный способ, не требующий сложного оборудования и больших затрат.

Результаты

Моделирование процесса переохлаждения криогенной жидкости базируется на следующих исходных зависимостях.

- 1) Динамика газового объема емкости [2]

$$\frac{d}{d\tau} \left[\frac{V_2 P_2}{RT_2} \right] = \dot{m}_u - \dot{m}_{\partial p}, \quad (1)$$

где V_2 – объем газа в емкости, м³;
 P_2 – давление газа над поверхностью жидкости,

Па;

R – универсальная газовая постоянная;

T_2 – температура газа, К;

\dot{m}_u – массовый расход испаряющейся за 1 с жидкости, кг/с;

$\dot{m}_{\partial p}$ – массовый расход дренируемого за 1 с газа, кг/с.

- 2) Массовый расход дренируемого газа [3]

Гребенников Антон Александрович – ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», канд. физ.-мат. наук, преподаватель, e-mail: anton18885@yandex.ru

Калядин Олег Витальевич – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: kaljadin@gmail.com

Сергеев Александр Викторович – ВГТУ, аспирант, e-mail: sergeev-av@bk.ru

Свиридов Олег Петрович – АО ИК КБХА, канд. техн. наук, нач. отдела, тел. 8(473) 277-14-40

Голев Игорь Михайлович – ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: imgolev@gmail.com

Курьянов Сергей Александрович – АО ИК КБХА, нач. бригады, тел. 8(473) 270-39-61

$$\dot{m}_{op} = \frac{\pi d_{mp}^2}{4} \sqrt{\frac{P_2^2 - P_3^2}{\left(\frac{\lambda l_{mp}}{d_{mp}} + \sum \xi_i\right) RT_{mp}}} \quad (2)$$

где d_{mp} – диаметр трубопровода, м;
 P_3 – давление эжектирования, Па;
 λ – коэффициент Дарси;
 l_{mp} – длина трубопровода, м;
 ξ_i – коэффициенты местных сопротивлений;
 T_{mp} – температура стенок трубопровода, К.
 3) Количество тепла, полученное газом в дренажном трубопроводе в единицу времени [4]

$$\dot{Q}_{nl} = \dot{m}_{op} c_{pз} (T_3 - T_2), \quad (3)$$

где $c_{pз}$ – теплоемкость газа, Дж/(кг·К);
 T_3 – температура перед эжектором, К.
 4) Количество тепла, подведенное к газу через поверхность дренажного трубопровода в единицу времени [4]

$$\dot{Q}_{nl} = \pi d_{mp} l_{mp} K_T (T_a - T_3), \quad (4)$$

где K_T – коэффициент теплопередачи, $\frac{Вт}{м^2 К}$;
 T_a – температура окружающей среды, К.
 5) Изменение количества тепла в жидкой фазе, при изменении температуры жидкости в единицу времени [4]

$$\dot{Q}_{жс} = m_{жс} c_{pжс} \dot{T}_{жс}, \quad (5)$$

где $m_{жс}$ – масса жидкости, К;
 $c_{pжс}$ – теплоемкость жидкости, Дж/(кг·К).
 6) Количество тепла, выведенного из жидкой фазы вместе с испарившейся жидкостью в единицу времени [4]

$$\dot{Q}_u = r \dot{m}_u, \quad (6)$$

где r – скрытая теплота испарения, Дж/кг.
 7) Массовый расход жидкости, испарившейся с зеркала емкости [5]

$$\dot{m}_u = \beta F_3 (P_{нжс} - P_{нз}), \quad (7)$$

где β – коэффициент испаряемости жидкости;
 F_3 – площадь поверхности жидкости, м²;
 $P_{нжс}$ – давление насыщения жидкости, Па;
 $P_{нз}$ – давление насыщения газа, Па.
 8) Массовый расход газа через эжектор [6]

$$\dot{m}_3 = \dot{m}(P). \quad (8)$$

9) Уравнение Клапейрона-Клаузиуса [7]

$$\frac{r}{v_2 - v_{жс}} = T_{нз} \frac{dP_{нз}}{dT_{нз}}, \quad (9)$$

где $v_{жс}$ – удельный объем жидкости, м³/кг;
 v_2 – удельный объем газа, м³/кг;
 $T_{нз}$ – температура насыщения газа, К.
 10) Уравнение газового состояния для газового объема емкости [8]

$$m_2 = \frac{V_2 P_2}{RT_2}, \quad (10)$$

где m_2 – масса газа в емкости, кг.

При разработке предлагаемой модели процессов переохлаждения криогенных жидкостей в емкости были приняты следующие допущения:

1) теплообмен криогенной жидкости, находящейся в емкости, с окружающей средой равен нулю. Это допущение правомерно для емкости оборудованной экранно-вакуумной изоляцией;

2) теплообмен газа, в газовом объеме емкости, с окружающей средой равен нулю. Это допущение правомерно по причине, указанной в предыдущем пункте;

3) удельный объем жидкости пренебрежимо мал по сравнению с удельным объемом газа находящегося над поверхностью жидкости в емкости, в связи с этим им можно пренебречь. Это допущение правомерно, поскольку плотность жидкости приблизительно на три порядка больше плотности газа на линии насыщения;

4) в качестве температуры газа в дренажном трубопроводе (T_{mp}) принята средняя по длине трубопровода температура, определяемая как средняя величина между температурой газа в емкости (T_2) и температурой перед эжектором (T_3);

5) массовый расход газа в дренажном трубопроводе определяется из условия изотермического течения газа по длинному трубопроводу при температуре T_{mp} ;

6) параметры газа в газовом объеме емкости (P_2 , T_2) подчиняются зависимостям справедливым для насыщения пара. Это допущение справедливо ввиду большой длительности (~3000-4000 с) описываемого процесса при относительно небольшом изменении параметров газа (P_2 , T_2). При этом параметры газа в газовом объеме успевают выйти на линию насыщения.

На основании допущений уравнение (10) принимает вид:

$$\frac{1}{v_2} = \frac{m_2}{V_2} = \frac{P_2}{RT_2} = \frac{P_{нз}}{RT_{нз}}. \quad (11)$$

Подставив полученное выражение для v_2 в (9) с учетом допущений получаем:

$$\frac{rP_{нз}}{RT_{нз}} = T_{нз} \frac{dP_{нз}}{dT_{нз}}. \quad (12)$$

После разделения переменных и интегрирования от начальных значений давления и температуры насыщенного газа ($P_{нз0}$, $T_{нз0}$) до конечных ($P_{нз}$, $T_{нз}$) находим:

$$\ln \frac{P_{нз}}{P_{нз0}} = -\frac{r}{R} \frac{1}{T_{нз0}} \left(\frac{T_{нз0}}{T_{нз}} - 1 \right). \quad (13)$$

После преобразований получаем:

$$P_{нз} = P_{нз0} e^{-\frac{r}{RT_{нз0}} \left(\frac{T_{нз0}}{T_{нз}} - 1 \right)} \quad (14)$$

или

$$T_{нз} = \frac{T_{нзО}}{1 + \frac{RT_{нзО}}{r} \ln \frac{P_{нзО}}{P_{нз}}} \quad (15)$$

Если в полученные выражения (14) и (15) подставить значение температуры насыщения жидкости, то получим давление насыщенного пара для данной температуры

$$P_{нжс} = P_{нжсО} e^{-\frac{r}{RT_{нжсО}} \left(\frac{T_{нжсО}}{T_{нжс}} - 1 \right)} \quad (16)$$

или

$$T_{нжс} = \frac{T_{нжсО}}{1 + \frac{RT_{нжсО}}{r} \ln \frac{P_{нжсО}}{P_{нжс}}} \quad (17)$$

На основании допущения 1 можно написать:

$$\frac{dQ_{жс}}{d\tau} + \frac{dQ_u}{d\tau} = 0 \quad (18)$$

или

$$m_{жс} c_{ржс} \dot{T}_{жс} - r \dot{m}_u = 0 \quad (19)$$

После разделения переменных полученного дифференциального уравнения и интегрирования, учитывая, что

$$\dot{T}_{жс} = \frac{dT_{жс}}{d\tau}; \quad \dot{m}_u = \frac{dm_{жс}}{d\tau} \quad (20)$$

получаем выражение, позволяющее определить массу жидкости при заданной температуре:

$$\ln \frac{m_{жс}}{m_{жсО}} = \frac{c_{ржс}}{r} (T_{жс} - T_{жсО}), \quad (21)$$

$$m_{жс} = m_{жсО} e^{\frac{c_{ржс} T_{жсО}}{r} \left(\frac{T_{жс}}{T_{жсО}} - 1 \right)} \quad (22)$$

Или

$$T_{жс} = T_{жсО} \left(1 + \frac{r}{c_{жс} T_{жсО}} \ln \frac{m_{жс}}{m_{жсО}} \right) \quad (23)$$

Поскольку количество тепла, полученное газом в дренажном трубопроводе равно количеству тепла подведенного к газу через поверхность дренажного трубопровода, то, приравняв (3) и (4) получаем:

$$\dot{m}_{оп} c_{рз} (T_3 - T_2) = \pi d_{mp} l_{mp} K_T (T_a - T_3) \quad (24)$$

Откуда

$$T_3 = \frac{T_a + AT_2}{1 + A}, \quad (25)$$

где

$$A = \frac{\dot{m}_{оп} c_{рз}}{\pi d_{mp} l_{mp} K_T} \quad (26)$$

Коэффициент теплопередачи (K_T) определяется расчетным путем. На основании допущения 4 температура T_{mp} равна:

$$T_{mp} = \frac{T_2 + T_3}{2} = \frac{T_2 + \frac{T_a + AT_2}{1 + A}}{2} = \frac{T_a + (2A + 1)T_2}{2(1 + A)} \quad (27)$$

Преобразуем уравнение (2).

Обозначим эффективную площадь проходного сечения трубопровода [2]

$$f_{эф} = \frac{\pi d_{mp}^2}{4} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{\lambda l_{mp}}{d_{mp}} + \sum \xi_i}}, \quad (28)$$

тогда давление P_3 равно

$$P_3 = \sqrt{P_2^2 - RT_{mp} \left(\frac{\dot{m}_{оп}}{f_{эф}} \right)^2} \quad (29)$$

Массовый расход газа через эжектор с достаточной степенью точности можно описать функцией [6]

$$\dot{m}_3 = a e^{\beta P_3}, \quad (30)$$

где a и β – коэффициенты эжектора.

Преобразуя (30) относительно P_3 , получаем

$$P_3 = \frac{1}{\beta} \ln \frac{\dot{m}_3}{a} \quad (31)$$

Характеристику испаряемости криоагента β в исследуемом диапазоне температур выбирают на основе справочных данных, либо измеряют экспериментально. Для некоторых сжиженных газов, в частности, кислорода, с достаточной точностью можно записать

$$\beta = S e^{n T_{жс}}, \quad (32)$$

где S и n – подборочные коэффициенты.

Тогда уравнение, определяющее расход газа, испарившегося с поверхности жидкости (зеркало), принимает вид

$$m_u = \frac{\pi}{4} d_b^2 (P_{нжс} - P_{нз}) S e^{n T_{жс}}, \quad (33)$$

где d_b – внутренний диаметр бака, м.

Постоянные коэффициенты a и β в формуле (31) определяются экспериментальным путем для конкретного эжектора путем его продувки

Постоянные коэффициенты S и n определяются экспериментальным путем при вакуумировании емкости, заполненной жидким криоагентом. Полученная зависимость будет справедлива и для других емкостей в том же диапазоне температур.

Рассмотрим уравнение (1). Будем считать, что в интервале времени $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ расходы \dot{m}_{op} и \dot{m}_u постоянные. Интегрирование уравнения в этом интервале приводит к следующему результату:

$$\frac{V_{z_2} P_{z_2}}{RT_{z_2}} - \frac{V_{z_1} P_{z_1}}{RT_{z_1}} = (\dot{m}_u - \dot{m}_{op}) \Delta\tau, \quad (34)$$

где индексы 1 и 2 соответствуют состоянию параметров газа в моменты времени τ_1 и τ_2 .

Давление газа в момент времени τ_2 :

$$P_{z_2} = \frac{RT_{z_2} (\dot{m}_u - \dot{m}_{op}) \Delta\tau}{V_{z_2}} + \frac{V_{z_1} P_{z_1} T_{z_2}}{V_{z_2} T_{z_1}} =$$

$$= \frac{RT_{z_2} (\dot{m}_u - \dot{m}_{op}) \Delta\tau + V_{z_1} P_{z_1} \frac{T_{z_2}}{T_{z_1}}}{V_{z_2}}. \quad (35)$$

Величина объема газа в момент времени τ_1 :

$$V_{z_1} = V_0 - \frac{m_{u_1}}{\rho_{ж}}, \quad (36)$$

где m_{u_1} - масса испарившейся жидкости к моменту времени τ_1 ;

$\rho_{ж}$ - плотность жидкости при температуре и давлении в момент времени τ_1 .

Величина газового объема в момент времени τ_2 :

$$V_{z_2} = V_0 - \frac{m_{u_1}}{\rho_{ж}} + \frac{m_{u_1} \Delta\tau}{\rho_{ж}}. \quad (37)$$

За интервал времени порядка 100 с температура газа меняется в среднем на 1%, поэтому в формуле (35) можно принять $T_{z_2} = T_{z_1}$. Тогда

$$P_{z_2} = \frac{RT_{z_1} (\dot{m}_u - \dot{m}_{op}) \Delta\tau + V_{z_1} P_{z_1}}{V_{z_2}}. \quad (38)$$

Таким образом, получена система уравнений, позволяющая определить термодинамические параметры криоагента в каждый момент процесса эжектирования. Предварительно для выполнения вычислений необходимо определить экспериментальным путем или задать в качестве исходных данных постоянные коэффициенты a , β , S , n .

Коэффициент Дарси в (28) определяется по формуле [2]

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d_{mp}} \right)^{0,25}, \quad (39)$$

где Δ - абсолютная шероховатость трубы.

Коэффициент теплопередачи нетеплоизолированной дренажной трубы определяется по формуле:

$$K_T = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_k}}, \quad (40)$$

где α - коэффициент теплоотдачи от воздушной среды, $\frac{Bm}{m^2 K}$;

δ - толщина стенки трубы, м;

λ - коэффициент теплопроводности материала трубы, $\frac{Bm}{mK}$;

α_k - коэффициент теплоотдачи к дренируемому газу, $\frac{Bm}{m^2 K}$.

Коэффициент теплоотдачи к газообразному криоагенту определяется по формуле для вынужденного конвективного теплообмена в турбулентной области. На основании вышеизложенного $\alpha_k \gg \alpha_B$, следовательно $\frac{1}{\alpha_B} \gg \frac{1}{\alpha_k}$.

Поскольку труба тонкостенная, величина $\frac{1}{\alpha_B} \gg \frac{\delta}{\lambda}$. Отсюда следует, что без большой погрешности можно написать $K_T \approx \alpha_B$.

Согласно [1] для воздуха, омывающего трубы, расположенные горизонтально или вертикально, применимы следующие формулы:

$$\alpha = 1,17 \left(\frac{\Delta t}{l} \right)^{1/4}, \quad (41)$$

при $l^3 \Delta t < 2 \text{ К} \cdot \text{м}^3$,

$$\alpha = 1,64 \cdot \Delta t^{1/3}, \quad (42)$$

при $l^3 \Delta t > 2 \text{ К} \cdot \text{м}^3$, где l - определяющий размер.

Для трубы, расположенной горизонтально $l = d_{mp}$ - диаметр трубы; для трубы, расположенной вертикально $l = h$ - высота трубы.

Дренажный трубопровод состоит из участков, расположенных как горизонтально, так и вертикально. Коэффициент теплоотдачи определим как среднее значение

$$\alpha = \frac{\alpha_z + \alpha_B}{2}, \quad (43)$$

где α_z - коэффициент теплоотдачи горизонтальных участков трубы;

α_B - коэффициент теплоотдачи для вертикальных участков трубы.

Таким образом, получена система уравнений, описывающих теплофизические процессы, происходящие в системе при переохлаждении криоагента. Для ее численного решения был разработан алгоритм, позволяющий по заданным начальным условиям вычислить параметры жидкости в каждый момент процесса эжектирования с некоторой заданной точностью.

В качестве исходных данных, необходимых для расчета задаются: начальное давление жидкости ($P_{жн}$), начальная температура жидкости ($T_{жн}$), конечная температура жидкости ($T_{жк}$), T_a , начальная масса жидкости ($m_{жн}$), объем бака (V_0), d_0 , d_{mp} , l_{mp} , $c_{pж}$, $c_{pг}$, R , r , K_T , $f_{эф}$, a_l , b , S , n , $\Delta\tau$.

Далее расчет производится следующим образом.

- 1) Устанавливаются следующие равенства

$$P_{жн} = P_z = P_{жс}; T_{жн} = T_z = T_{жс}; m_{жн} = m_n.$$

Принимаем $\Delta\tau = 1с$.

- 2) Расходу газа через эжектор присваиваются начальное значение $\dot{m}_g = 0$.

- 3) Расход газа через эжектор определяется по формуле

$$\dot{m}_g = \dot{m}_g + 0,001. \quad (44)$$

- 4) Определяется комплекс А по формуле

$$A = \frac{\dot{m}_g c_{pг}}{\pi d_{mp} l_{mp} K_m}. \quad (45)$$

- 5) Определяется температура T_g по формуле (25).

- 6) Определяется температура T_{mp} по формуле

$$T_{mp} = \frac{T_z + T_g}{2}. \quad (46)$$

- 7) Определяется значение P_g по формуле (31)

- 8) Определяется давление P_{g1} по формуле (29), где вместо m_{op} необходимо поставить \dot{m}_g .

- 9) Производится сравнение давления P_g и P_{g1} . Должно выполняться неравенство $P_g > P_{g1}$. Если неравенство не выполняется, то повторяется расчет по пунктам 3÷9, если выполняется, то производится переход к пункту 10.

- 10) Определяется массовый расход испарившейся жидкости по формуле

$$\dot{m}_u = \frac{\pi}{4} d_0^2 (P_{жк} - P_{г}) S e^{nT_{жк}}. \quad (47)$$

- 11) Определяется величина понижения температуры жидкости по формуле

$$\Delta T_{жс} = \frac{r \dot{m}_u \Delta\tau}{\dot{m}_{жс} c_{жс}}. \quad (48)$$

- 12) Определяется температура жидкости $T_{жс1}$

$$T_{жс1} = T_{жс} - \Delta T_{жс}. \quad (49)$$

- 13) Определяется давление жидкости $P_{жс1}$

$$P_{жс1} = P_{жн} e^{-\frac{r}{RT_{жн}} \left(\frac{T_{жн}}{T_{жс1}} - 1 \right)}. \quad (50)$$

- 14) Определяется плотность жидкости по полиномиальной формуле, полученной на основе справочных данных для используемого криоагента, при значениях температуры и давления $T_{жс}$, $P_{жс}$.

- 15) Определяется плотность жидкости при значениях температуры и давления $T_{жс1}$, $P_{жс1}$.

- 16) Определяется масса жидкости $m_{жс1}$

$$m_{жс1} = m_{жн} e^{-\frac{c_{жс} T_{жн}}{r} \left(\frac{T_{жс1}}{T_{жн}} - 1 \right)}. \quad (51)$$

- 17) Определяется объем газа V_z

$$V_z = V_0 - \frac{m_{жс}}{\rho_{жс}}. \quad (52)$$

- 18) Определяется объем газа V_{z1}

$$V_{z1} = V_0 - \frac{m_{жс1}}{\rho_{жс1}}. \quad (53)$$

- 19) Определяется давление газа P_{z1}

$$P_{z1} = \frac{P_z V_z + (\dot{m}_n - \dot{m}_g) RT_z \Delta\tau}{V_{z1}}. \quad (54)$$

- 20) Определяется температура газа T_{z1}

$$T_{z1} = \frac{T_{zn}}{1 + \frac{RT_{zn}}{r} \ln \frac{P_{zn}}{P_{z1}}}. \quad (55)$$

- 21) Определяется время процесса

$$\tau_1 = \tau + \Delta\tau. \quad (56)$$

- 22) Присваиваются значения

$$P_z = P_{z1}; T_g = T_{g1}; P_{ж} = P_{ж1}; T_{ж} = T_{ж1}; m_{ж} = m_{ж1}; \tau = \tau_1.$$

23) Производится сравнение полученного значения температуры жидкости с заданным конечным значением. Если $T_{жс} > T_{жкс}$, то расчет повторяется с пункта 2 по пункт 22. Если $T_{жс} \leq T_{жкс}$, то расчет заканчивается.

Расчет по приведенному алгоритму позволяет получить значения следующих параметров как функции времени:

$$P_{жс} = f(\tau); T_{жс} = f(\tau); m_{жс} = f(\tau);$$

$$P_2 = f(\tau); T_1 = f(\tau); P_3 = f(\tau).$$

Для проверки применимости разработанной модели к определению параметров процесса переохлаждения рассчитанные с ее помощью зависимости были сопоставлены с экспериментальными, полученными при эжектировании жидкого кислорода на испытательном стенде АО ИК КБХА.

Для определения коэффициента испаряемости кислорода β на испытательном стенде АО ИК КБХА был проведен эксперимент по захлаживанию емкости, частично заполненной кислородом. Захлаживание проводилось путем эжектирования, при этом регистрировались следующие параметры в режиме реального времени: температура жидкого кислорода в баке ($T_{жс}$); давление паров кислорода на входе в эжектор (P_3); уровень кислорода в емкости (m_3). После обработки этих данных с использованием формулы (7) получены значения коэффициента испаряемости β . Полученные значения интерполируются формулой (32) с коэффициентами $S = 5,76 \cdot 10^{-11}$; $n = 0,1227$.

В системе эжектирования жидкого кислорода был применен эжектор с коэффициентами $a_1 = 0,08$; $b = 2,35 \cdot 10^{-5}$.

Расчет параметров переохлаждения жидкого кислорода производился с помощью программы для ЭВМ, в которой был реализован приведенный выше алгоритм. Результаты вычислений, а также соответствующие им экспериментальные данные, приведены в виде графиков на рис. 1-3. Сопоставляя данные зависимости можно сделать вывод, что результаты расчета имеют хорошую сходимость с экспериментом, таким образом, разработанная модель позволяет с хорошей точностью описать процесс переохлаждения.

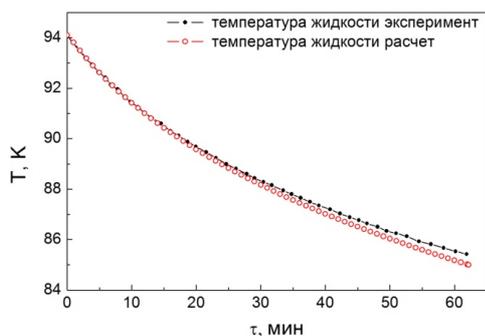


Рис. 1. График изменения температур при переохлаждении кислорода

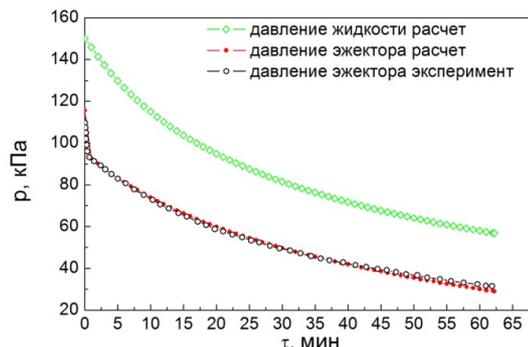


Рис. 2. График изменения давлений при переохлаждении кислорода

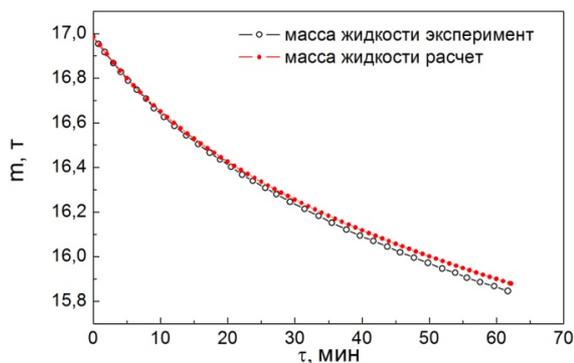


Рис. 3. График изменения массы жидкости при переохлаждении кислорода

Выводы

Разработана математическая модель переохлаждения криогенных компонент в стендовых баках путем эжектирования. Она описывает процесс уменьшения температуры и давления переохлаждаемой жидкости с течением времени, а также характер изменения массы неиспарившегося криоагента в процессе эжектирования.

Разработана методика расчета процесса захлаживания криогенных жидкостях путем эжектирования перед подачей в магистральный трубопровод, позволяющая автоматизировать вычисления с помощью ЭВМ.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных, полученных при эжектировании жидкого кислорода, показывает хорошую сходимость результатов расчета с экспериментом.

Литература

1. Филин Н.В. Жидкостные криогенные системы [Текст] / Н.В. Филин, А.Б. Буланов. – Л.: Машиностроение, 1985. – 254 с.
2. Гинзбург И.П. Прикладная гидрогазодинамика [Текст] / И.П. Гинзбург. – Л.: ЛГУ, 1958. – 325 с.
3. Альтшуль А.Д. Гидравлика и аэродинамика [Текст] / А.Д. Альтшуль, В.Г. Киселев. – М.: Стройиздат, 1975. – 323 с.
4. Флореа О. Расчеты по процессам и аппаратам химической технологии [Текст] / О. Флореа, О. Смигельский. – М.: Химия, 1971. – 448 с.

5. Акуличев В.А. Кавитация в криогенных и кипящих жидкостях [Текст] / В.А. Акуличев. – М.: Наука, 1978. – 256 с.
6. Соколов Е.Я. Струйные аппараты [Текст] / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер – М.: Энергия, 1970. – 276 с.

7. Малков М.П. Справочник по физико-техническим основам криогеники [Текст] / М.П. Малков. – М.: Мир, 1985. – 145 с.
8. Асаев С.И. Основы термодинамики, газовой динамики и теплопередачи [Текст] / С.И. Асаев. – М.: Энергия, 1968. – 157 с.

Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
Воронежский государственный технический университет
Акционерное общество испытательный комплекс «Конструкторское бюро химавтоматики»

MODELLING OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF CRYOGENIC LIQUID SUPERCOOLING

- A.A. Grebennikov**, PhD of Physical and mathematical sciences, Lecturer, Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin, Voronezh, Russian Federation, e-mail: anton18885@yandex.ru
- O.V. Kalyadin**, PhD of Physical and mathematical sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kaljadin@gmail.com
- A.V. Sergeev**, Postgraduate, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: sergeev-av@bk.ru
- O.P. Sviridov**, PhD of Technical sciences, Head of Department, KB Khimavtomatika, Voronezh, Russian Federation, Tel.: +7(473) 277-14-40
- I.M. Golev**, Grand PhD of Physical and mathematical sciences, Full Professor, Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin, Voronezh, Russian Federation, e-mail: imgolev@gmail.com
- S.A. Kuryanov**, Brigade Head, KB Khimavtomatika, Voronezh, Russian Federation, Tel.: +7(473) 270-39-61

In the paper was researched the industrial methods of cryogenic liquid supercooling. A mathematical model of cryogenic liquid supercooling in containers under vacuum ejector vapor space was developed. The resulting system of equations describes the thermal processes occurring during subcooling of cryogenic liquid, allowing to obtain values fluid mass, pressure, temperature, liquid phase, and the pressure and temperature of the gas phase to the selected time

To perform the automatic calculation it has been developed an algorithm based on the model that allows for given initial conditions to calculate the parameters of the cryogenic liquid in each time of ejection process with some desired accuracy. The proposed algorithm was used to writing software, which graphically displays the results in the form of tables and graphs. The time dependence of temperature, pressure, mass of liquid oxygen at the supercooling in a cryogenic tank obtained using the developed model are attached. At the checking the validity of the developed model to determine ejection process parameters generated by the model were compared according to the experimental obtained for subcooled liquid oxygen on the test bench АО ИК КВНА. It was found that the calculation results have a good agreement with experiment

Key words: ejecting, cryoagent, modeling, algorithm

References

1. Filin N.V., Bulanov A.B. ZHidkostnye kriogennye sistemy [Liquid cryogenic systems]. Leningrad, Mashinostroenie, 1985. 254 p.
2. Ginzburg I.P. Prikladnaya gidrogazodinamika [Applied fluid dynamics]. Leningrad, LSU, 1958. 325 p.
3. Al'tshul' A.D., Kiselev V.G. Gidravlika i aehrodinamika [Hydraulics and Aerodynamics]. Moscow, Strojizdat, 1975. 323 p.
4. Florea O, Smigel'skij O. Raschety po processam i apparatam himicheskoy tekhnologii [Calculations for the processes and apparatuses of chemical technology]. Moscow, Himiya, 1971. 448 p.
5. Akulichев V.A. Kavitiaciya v kriogennyh i kipya-shchih zhidkostyah [Cavitation in cryogenic and boiling liquids]. Moscow, Nauka, 1978. 256 p.
6. Sokolov E.YA., Zinger N.M. Strujnye apparaty [Inkjet devices]. Moscow, EHnergiya, 1970. 276 p.
7. Malkov M.P. Spravochnik po fiziko-tekhicheskim osnovam kriogeniki [Handbook of Physical-technical fundamentals of cryogenics]. Moscow, Mir, 1985. 145 p.
8. Asaev S.I. Osnovy termodinamiki, gazovoj di-namiki i teploperedachi [Fundamentals of thermodynamics, fluid dynamics and heat transfer]. Moscow, EHnergiya, 1968. 157 p.

АДГЕЗИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ КОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

И.М. Трегубов, М.Ю. Смолякова, М.А. Каширин

Проведено исследование адгезионной прочности тонкопленочных нанокompозитов $Fe_x(Al_2O_3)_{100-x}$ и $(Fe_{45}Co_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}$, полученных методом ионно-лучевого напыления, нанесенных на стальные подложки (12X18H10T). Композитные покрытия металл-керамика способны обеспечить в одном материале сочетание свойств, которыми обладают металл и керамика по отдельности. В реальных условиях эксплуатации помимо основных прочностных характеристик важную роль играет адгезионная прочность покрытия к защищаемой поверхности. В этой статье подробно описана методика проведения адгезионных испытаний упрочняющих покрытий к металлической поверхности и дано описание механизмов разрушения покрытий в процессе испытаний при различной концентрации металлической фазы в покрытиях. Установлено, что покрытия $Fe_x(Al_2O_3)_{100-x}$ и $(Fe_{45}Co_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}$ с различной концентрацией металлической фазы при царапании истираются, но не отслаиваются, то есть разрушаются по когезионному механизму, связанному с пластической деформацией и образованием усталостных трещин в материале покрытия.

Ключевые слова: адгезионная прочность, тонкопленочные нанокompозиты

Введение

Создание защитного покрытия на поверхности готового изделия всегда является эффективным средством повышения износостойкости металлических изделий. Однако не совпадение коэффициентов термического расширения, значительное различие твердости покрытия и основы, а так же слабая в ряде случаев адгезия покрытия к поверхности изделия, работающего в узлах трения, затрудняют внедрение и использование покрытий, как универсального средства защиты и упрочнения. Известно, что наилучшие результаты в области защитных покрытий достигнуты в наноструктурных и композитных покрытиях, но и они не лишены указанных недостатков [1, 2].

Возможным решением известных проблем может стать применение покрытий на основе композитов металл-керамика. Такие покрытия могут обеспечить сочетание в одном материале преимуществ, которыми обладают керамика (твердость, прочность, химическая инертность, термостойкость и т.п.) и металлические сплавы (пластичность, упругость, широкий интервал значений температурных коэффициентов линейного расширения, теплопроводность и т.п.) по отдельности. Если исходить из того, что в качестве металлической фазы таких композитов может выступать материал защищаемой поверхности, то в таком случае многие проблемы, сопутствующие использованию напыляемых покрытий, будут решены автоматически. Это показано в работах [4-8], в которых подробно ис-

следовалась структура и механические (микротвердость, износостойкость) свойства, гранулированных композитов.

Решающим фактором использования покрытия является увеличение ресурса конечного продукта или изделия, а значит в конечном итоге повышение износостойкости. Адгезионная прочность покрытия к защищаемой поверхности является важным параметром, влияющим на износостойкость покрытий. С этой целью и проводилось исследование адгезионной прочности композиционных покрытий $Fe_x(Al_2O_3)_{100-x}$ и $(Fe_{45}Co_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}$ к поверхности стали и механизмов разрушения покрытия в зависимости от концентрации металлической фазы.

Методика

Образцы композиционных покрытий $Fe-Al_2O_3$, $Fe_{45}Co_{45}Zr_{10}-Al_2O_3$ получены методом ионно-лучевого распыления на установке, разработанной и сконструированной доктором физ.-мат. наук Ситниковым А.В. на кафедре ФТТ ВГТУ. Особенности работы установки и получения образцов описаны в работе [3]. Образцы напылялись на стальные подложки (12X18H10T) подложки на поверхности которых, в результате процессов самоорганизации, происходило формирование двухфазной структуры. Шероховатость образцов исследовалась на автоматизированном прецизионном контактно-профилометре SURTRONIC 25 по ГОСТ 2789-73. Толщина образцов в каждом напылении контролировалась с помощью интерферометра МИИ-4 и профилометра SURTRONIC 25, составляла 4–8 мкм, в зависимости от времени напыления и состава.

Измерение концентрации химических элементов, входящих в состав сплава, проводилось методом электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа. Измерения проводились на сканирующем рентгеновском микроанализаторе JXA-840 с погрешностью, не превышающей 1,5 % от содержания измеряемого элемента. Определяемый со-

Трегубов Илья Михайлович – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: ilia.tregubov@mail.ru
 Смолякова Марина Юрьевна – НИУ БелГУ, канд. техн. наук, младший научный сотрудник, e-mail: SmolyakovaMarina@bsu.edu.ru
 Каширин Максим Александрович – ВГТУ, инженер, e-mail: mnitro@yandex.ru

став композиционного материала отражал содержание химического элемента, выраженное в атомных процентах.

Для определения адгезионной/когезионной прочности, стойкости к царапанию, а также для исследования механизма разрушения использовался скретч-тестер REVETEST (CSM Instruments). На поверхность покрытия алмазным сферическим индентором типа “Роквелл С” с радиусом закругления 200 мкм наносили царапины при непрерывно нарастающей нагрузке по схеме, приведенной на рис. 1.

В процессе испытаний осуществлялась регистрация таких физических параметров, как акустическая эмиссия, коэффициент трения и глубина проникновения индентора, величина нормальной нагрузки. Для получения достоверных результатов на поверхность образцов с покрытием наносилось по три царапины.

Испытания проводились при следующих условиях: нагрузка на индентор нарастала от 0,9 до 50 Н, скорость перемещения индентора – 1 мм/мин, длина царапины составила 10 мм, скорость нагружения – 6,91 Н/мин, частота дискретности сигнала – 60, акустическая эмиссия – 9. В результате испытаний определялась минимальная (критическая) нагрузка $Lc1$, которая обозначает начало проникновения индентора в покрытие; $Lc2$ – начало появления первой трещины; $Lc3$ – отслаивание некоторых участков покрытия; $Lc4$ – пластическое истирание покрытия до подложки.



Рис. 1. Схема испытания на адгезионную прочность

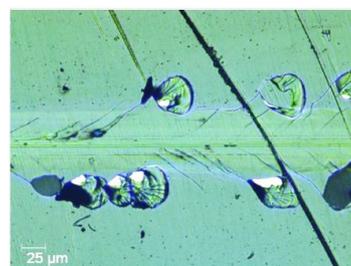
Результаты

Адгезионная прочность покрытий определялась по изменению характера сигнала акустической эмиссии, возникающей при скрайбировании индентором Роквелла по исследованной поверхности.

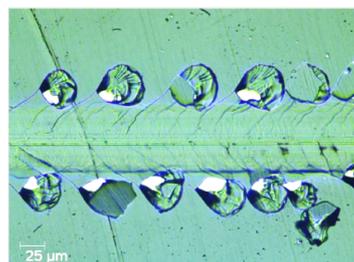
В процессе экспериментов было установлено, что покрытия $Fe_x(Al_2O_3)_{100-x}$ и $(Fe_{45}Co_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}$ с различной концентрацией металлической фазы при царапании истираются, но не отслаиваются, то есть разрушаются по когезионному механизму, связанному с пластической

деформацией и образованием усталостных трещин в материале покрытия.

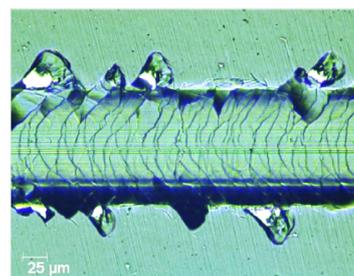
На рис. 2 показан пример поверхности композиционных покрытий $Fe_x(Al_2O_3)_{100-x}$, нанесенных на стальные подложки и подвергнутых испытаниям на адгезионную стойкость. В целом процесс разрушения покрытий при скрайбировании алмазным индентором можно разделить на несколько стадий (см. рис. 3). В начале процесса (стадия а) происходит монотонное проникновение индентора в покрытие при этом покрытие оказывает существенное сопротивление проникновению индентора, коэффициент трения немонотонно увеличивается (за счет шероховатости покрытия), сигнал акустической эмиссии сохраняется неизменным. Затем, при увеличении нагрузки (стадия б), уровень амплитуды акустической эмиссии начинает изменяться, незначительно изменяется значение коэффициента трения.



а



б



в

Рис. 2. Фотографии поверхности композиционных покрытий $Fe_x(Al_2O_3)_{100-x}$, нанесенных на стальные подложки и подвергнутых механическому воздействию сферическим контртелом; (а) 80 ат.%Me 3,89Н; (б) 80 ат.%Me 6,49Н; (в) 80 ат.%Me 14,43Н

На стадии в и г (рис. 3) с увеличением нагрузки происходит незначительное увеличение коэффициента трения с образованием сплошных сколов по всему краю царапины (рис. 2в). В дальнейшем с ростом нагрузки, наблюдается катастрофическое разрушение покрытия, связанное с резким увеличе-

нием коэффициента трения и акустической эмиссии (рис. 3, стадия д).

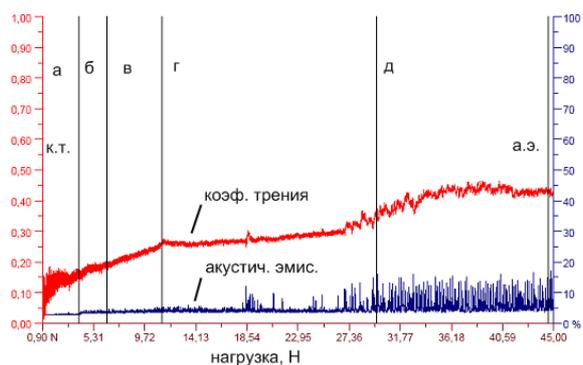


Рис. 3. Результаты адгезионных испытаний системы покрытие $Fe_{32}(AlO)_{18}$ – сталь 12X18H10T

При исследованиях покрытий $(Fe_{45}Co_{45}Zr_{10})_x(AlO)_{100-x}$, нанесенных на металлические подложки и подвергнутых испытаниям на адгезию, было подтверждено предположение, что механизм разрушения покрытия зависит от типа преобладающей фазы (металлической или керамической), то есть от вида матрицы [9, 10].

В том случае, когда матрицей является керамика (содержание керамики в композите более 50 ат. %), разрушение покрытия является в большей степени когезионным – при деформации начинается разрушение пленки и появляются характерные сколы большой площади по краям траектории движения контртела (рис. 4). Этот механизм обусловлен хрупкостью керамической фазы и сравнительно слабым межфазным взаимодействием в объеме композиционного покрытия.

Увеличение концентрации металлической фазы снижает когезионную составляющую разрушения пленки: на рис. 5 показана начальная стадия разрушения покрытия с высоким содержанием металлической фазы (67 ат. %). Разрушение покрытия с металлической матрицей (концентрация керамики не превышает 10 – 15 ат. %) происходит, по всей видимости, по иному механизму (рис. 6). Сколов на поверхности покрытия не наблюдается, а разрушение носит характер растрескивания, вызванного, по всей видимости, тем, что твердость металлической подложки значительно ниже, чем твердость покрытия. Важно, что нагрузка, при которой получены фотографии, различна. Это отражает тот факт, что чем больше в композитном покрытии металлической фазы, тем более значительное воздействие требуется для начала разрушения пленки.

В первом приближении исследования показывают, что нагрузка, при которой начинают появляться первые трещины на поверхности покрытия, прямо пропорциональна концентрации металлической фазы.

Результаты испытаний композитных покрытий $(Fe_{45}Co_{45}Zr_{10})_x(AlO)_{100-x}$ на адгезионную прочность подтверждает справедливость предложенного ме-

ханизма деформации данных материалов, сформированных на основе исследований микротвердости.

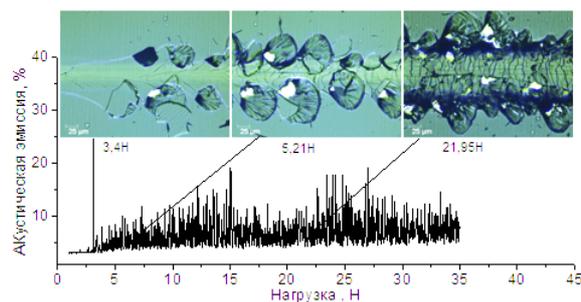


Рис. 4. Зависимость акустической эмиссии и фотографии поверхности композиционного покрытия $(Fe_{45}Co_{45}Zr_{10})_{37}(AlO)_{63}$, нанесенного на стальную подложку и подвергнутого механическому воздействию сферическим контртелом

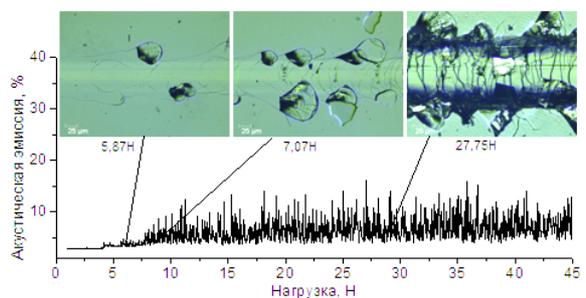


Рис. 5. Зависимость акустической эмиссии и фотографии поверхности композиционного покрытия $(Fe_{45}Co_{45}Zr_{10})_{67}(AlO)_{33}$, нанесенного на стальную подложку и подвергнутого механическому воздействию сферическим контртелом

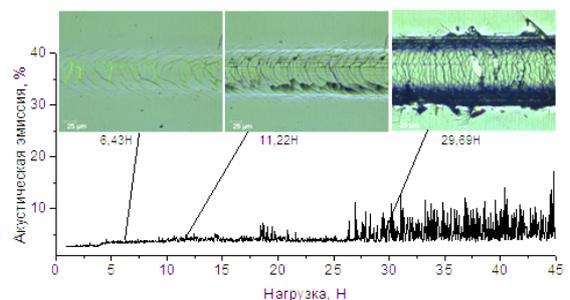


Рис. 6. Зависимость акустической эмиссии и фотографии поверхности композиционного покрытия $(Fe_{45}Co_{45}Zr_{10})_{82}(AlO)_{18}$, нанесенного на стальную подложку и подвергнутого механическому воздействию сферическим контртелом

Изменение концентрации композита происходит таким образом, что какая-либо фаза становится непрерывной, что приводит к тому, что при нагрузках материал (композит) начинает деформироваться в соответствии с тем механизмом, который присущ непрерывной фазе.

Если много керамики то, деформация осуществляется растрескиванием. Если же много металла, то деформация развивается, как в объемных металлических материалах [1]. Максимум наблюдается при смене механизмов деформации от меж-

фазных процессов проскальзывания и растрескивания к процессам деформирования объемных металлических материалов [9].

Максимальные значения микротвердости в нанокompозитах наблюдается в концентрационной области 80-85 ат.% Me [10], для которой проявляется оптимальная с точки зрения прочности морфология, которая представляет собой сплошную металлическую фазу с наличием дискретной фазы керамики. Если исходить из подобных представлений, то испытания адгезионной стойкости являются наглядным тому подтверждением (рис. 6). При такой морфологии обычный механизм пластического деформирования объемного аморфного металлического сплава (скольжение группы атомов вдоль касательного напряжения) блокируется, подобно тому, как блокируется движение дислокаций в нанокристаллических материалах [2]. К тому же при дискретности и металлической и керамической фазы, затрудняется процесс межфазного проскальзывания, а наличие лабиринтоподобной структуры металлической фазы предупреждает растрескивание керамики.

При уменьшении концентрации металлической фазы в нанокompозитах до значений меньших 45-50 ат. % происходит хрупкое разрушение покрытия при испытаниях на адгезионную стойкость (рис.4), при этом в таком концентрационном диапазоне микротвердость также снижается. По всей видимости, это является следствием изменения морфологии композитов: для низких концентраций металлической фазы основная объемная доля композита приходится на керамику, являющийся более хрупким материалом, нежели металлический сплав. Блокирование развития микротрещин в композитах с низким содержанием металла не происходит, поскольку отсутствует лабиринтоподобная структура металлических наногранул, следовательно, разрушение покрытия идет более активно по сравнению с другим концентрационным диапазоном [10]. Одним из возможных способов релаксации напряжений при механической нагрузке в подобных материалах является процесс проскальзывания гранул по межфазной границе [9] этот процесс инициируется значительно легче при активном зарождении микротрещин в керамической прослойке.

В образцах с высокой концентрацией металлической фазы (более 85 ат. %) происходит резкое снижение твердости [4-8]. В таком материале пластическая деформация при внешних нагрузках не блокируется, потому что керамической фазы настолько мало, что она перестает препятствовать деформированию металлической фазы и развивается точно также как в объемных материалах: при достижении предела текучести начинается максимально интенсивное разрушение покрытия [10].

Выводы

1. Установлено, что покрытия $Fe_x(Al_2O_3)_{100-x}$ и $(Fe_{45}Co_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}$ с различной концентрацией металлической фазы, нанесенные на стальную подложку (12X18H10T), при царапании истираются, но не отслаиваются, то есть разрушаются по когезионному механизму, связанному с пластической деформацией и образованием усталостных трещин в материале покрытия.

2. Доказано, что механизм когезионного разрушения покрытий подтверждает качественную модель деформации в подобных материалах, основанную на исследованиях микротвердости и нанопрофилирования в исследуемых покрытиях.

Литература

1. Малыгин, Г.А. Пластичность и прочность микро- и нанокристаллических материалов [Текст] / Г.А. Малыгин // Физика твердого тела. – 2007. – Т. 49. - Вып. 6. - С. 961-982

2. Левашов, Е.А. Многофункциональные наноструктурные пленки (Обзор) [Текст] / Е.А.Левашов, Д.В. Штанский // Успехи химии. – 2007. – Т. 76. – №5. – С.501 – 509.

3. Калинин, Ю.Е. Физические свойства нанокompозитов металл-диэлектрик с аморфной структурой [Текст] / Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, О.В. Стогней // Альтернативная энергетика и экология. - 2007. - №10. - С.9-21

4. Трегубов, И.М. Исследование механических свойств наноструктурных покрытий из гранулированного композита $Fe_x(Al_2O_3)_{100-x}$ [Текст] / И.М. Трегубов, М.А. Каширин, О.В. Стогней // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8. - № 9. - С.83-87.

5. Трегубов, И.М. Упрочняющие покрытия из гранулированного композита $Fe_x(Al_2O_3)_{100-x}$ [Текст] / И.М. Трегубов, О.В. Стогней, М.Ю. Смолукова, Д.Н. Клименко, М.А. Каширин / Известия высших учебных заведений. Сер. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2013. - №2. - С.37-44.

6. Упрочняющие нанокompозиционные покрытия $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}$ [Текст] / О.В. Стогней, С.Г. Валюхов, И.М. Трегубов, М.А. Каширин // Альтернативная энергетика и экология. – 2011. -№9 (101). - Вып. 22. - С. 190-194.

7. Влияние концентрации керамической фазы на механические свойства гранулированных нанокompозитов $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}$ [Текст] / С.Г. Валюхов, М.С. Добрынин, О.В. Стогней, И.М. Трегубов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8. - № 2. - С.60-65.

8. Трегубов И.М. Исследование износостойкости наноструктурных покрытий из гранулированного композита $(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_x(CaF_2)_{100-x}$ [Текст] / И.М. Трегубов, О.В. Стогней // Перспективные материалы. – 2011. – спец. вып. №12. - С. 493-497.

9. Veprek S. A concept for the design of novel superhard coatings / S. Veprek, S. Reiprich // Thin Solid Films. – 1995. – Vol. 268. – P. 64 – 71.

10. Трегубов И.М. Механические свойства нанокompозитных покрытий на основе Fe и Co с различными упрочняющими фазами (Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , CaF_2) [Текст]: дис. ... канд. физ.-мат. наук. - Воронеж, 2013, 157 с.

THE ADHESION STRENGTH OF THE COMPOSITE COATINGS BASED IRON

I.M. Tregubov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: ilia.tregubov@mail.ru

M. Yu. Smolyakova, Candidate of Technical Sciences, Belgorod National Research University, Belgorod, Russian Federation, e-mail: SmolyakovaMarina@bsu.edu.ru

M.A. Kashirin, Engineer, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: mnitro@yandex.ru

Has been investigated the adhesion strength of the composite coating $\text{Fe}_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ и $(\text{Fe}_{45}\text{Co}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$, obtained by ion-beam sputtering, supported on steel substrate (12X18H10T). Composite metal-ceramics coating capable of providing the material in one combination of properties possessed by the ceramics and metal individually. In real operating conditions beyond the basic strength properties of the important role played by the adhesive strength of the coating to the surface to be protected. This article describes in detail methods of adhesion test for metallic coatings hardening and surface coatings describes failure mechanisms during tests with different concentrations of the metallic phase in coatings. Established, that coatings $\text{Fe}_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ и $(\text{Fe}_{45}\text{Co}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ with different concentrations of the metallic phase in scratching erased, but not peeled, that is destroyed by cohesive mechanism, associated with plastic deformation and formation of fatigue cracks in the coating material

Key words: adhesive strength, thin-film nanocomposite

References

1. Malygin G.A. Plastichnost' i prochnost' mikro- i nanokristallicheskih materialov [Plasticity and strength of micro- and nanostructural materials]. *Physics of the Solid State*. 2007. V. 49. N. 6. P. 961-982
2. Levashov. E.A., Shtansky D.V. Mnogofunkcional'nye nanostrukturirovannye plenki [Multifunctional nanostructured films (Review)]. *Russian Chemical Reviews*. 2007. V.76. №5. P. 501 - 509.
3. Kalinin Yu. Fizicheskie svoystva nanokompozitov metall-dijelektrik s amorfnoy strukturoj [The physical properties of the nanocomposite metal-insulator with an amorphous structure] / Y.E. Kalinin, A.V. Sitnikov, O. Stogney // *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*. 2007. №10. P.9-21
4. Tregubov I.M. Issledovanie mehanicheskikh svoystv nanostrukturnykh pokrytij iz granulirovannogo kompozita $\text{Fe}_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ [Mechanical properties of nanostructured coatings of granular composite $\text{Fe}_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$] // I.M. Tregubov, M.A. Kashirin, O.V. Stogney, / *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2012. Tom.8. №9. P. 83-87.
5. Tregubov I.M. Uprochnjajushhie pokrytija iz granulirovannogo kompozita $\text{Fe}_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ [The reinforcing coating of Granulated composite $\text{Fe}_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$] // I.M. Tregubov, O.V. Stogney, M.Y. Smolyukova, D.N. Klimenko, M.A. Kashirin / *Proceedings of the higher educational institutions. In powder metallurgy and functional coatings*. 2013. №2. P. 37-44.
6. Stogney O.V. Uprochnjajushhie nanokompozicionnye pokrytija $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ [Reinforcing nanocomposite coatings $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$] // O.V. Stogney, S.G. Valyuhov, I.M. Tregubov, M.A. Kashirin / *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology №9 (101)*. 2011 Re.22. P.190-194.
7. Valyuhov S.G. Vlijanie koncentracii keramicheskoy fazy na mehanicheskie svoystva granulirovannykh nanokompozitov $(\text{Fe}_{45}\text{Co}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ [Effect of the ceramic phase concentration on the mechanical properties of granular nanocomposites $(\text{Fe}_{45}\text{Co}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$] // S.G. Valyuhov, M.S. Dobrynin, O.V. Stogney, I.M. Tregubov / *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2012. V.8. №2. P. 60-65.
8. Tregubov I.M. Issledovanie iznosostojkosti nanostrukturnykh pokrytij iz granulirovannogo kompozita $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{CaF}_2)_{100-x}$ [Study on the wear resistance, nanostructural coatings of granular composite $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{CaF}_2)_{100-x}$] // I.M. Tregubov, O.V. Stogney / *Advanced Materials*. 2011. Special. Vol. №12. P. 493-497.
9. Veprek S. A concept for the design of novel superhard coatings / S. Veprek, S. Reiprich // *Thin Solid Films*. 1995. Vol. 268. P. 64 – 71.
10. Tregubov I.M. Mehanicheskie svoystva nanokompozitnykh pokrytij na osnove Fe i Co s razlichnymi uprochnjajushhimi fazami $(\text{Al}_2\text{O}_3, \text{SiO}_2, \text{MgO}, \text{CaF}_2)$ [Mechanical The mechanical properties of nanocomposite coatings based on Fe and Co with different reinforcing phases $(\text{Al}_2\text{O}_3, \text{SiO}_2, \text{MgO}, \text{CaF}_2)$. Thesis for the degree of physical and mathematical sciences, Voronezh, 2013, 157 p.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ: ВОДОРОД В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОКРИСТАЛЛИЗАЦИИ

А.В. Звягинцева

Рассмотрены потенциальные возможности аккумулирования водорода некоторыми электрохимическими системами (алюминий, хром, никель, никель-бор). В работе рассмотрены возможности образования гидридов металлов при их катодном восстановлении при параллельных реакциях катиона Me^{n+} и H^+ . Установлено, что такое взаимодействие обусловлено как возможностью внедрения атома водорода и его локализации в структуре металла, так и способностью образования гидридов по дефектам структуры металла. Показано, что энергетика процессов взаимодействия металла с водородом в технологиях металлургии и гальваностегии различаются, поэтому рассмотрены некоторые механизмы взаимодействия водорода с электролитическими металлами и сплавами. Отмечена исключительная роль дефектов структуры, по которым возможно образование связей $Me-H$. Установлено, что устойчивые дефекты могут быть использованы для аккумулирования водорода в гидридной форме

Ключевые слова: гидрид металла, дефекты структуры, внутреннее трение, потенциал восстановления водорода, электрохимические системы, ионно-имплантированный дейтерий

Введение

Вопрос о роли водородной энергетики в развитии благосостояния общества можно рассматривать только в одном аспекте, а именно достойное существование того или иного сообщества может быть обеспечено только при всестороннем использовании водородных технологий. Иными словами степень совершенствования сообщества определяется уровнем развития водородной энергетики. Это не технократический пафос, а действительность современной жизни. Взаимодействие природы и человека, ее покоряющего, находятся на грани хрупкого равновесия. Непонимание возможности проблем водородной энергетики и полное отсутствие интереса со стороны государства могут привести не только к значительному отставанию в данной отрасли, но и к более серьезным последствиям. Проводившийся в России I конгресс по водородной энергетике в августе 2006 года показал, что российские ученые пока удерживают позицию по основным направлениям исследований, но это удается ценой невероятных усилий подвижников и энтузиастов. Финансовые вливания в водородную энергетику стран Запада и России просто несопоставимы. Вместе с тем следует указать на практическую значимость водородных технологий уже работающих в традиционной энергетике. Здесь, прежде всего, следует отметить работы в области практического использования водорода для охлаждения обмоток электрогенераторов.

Для этих целей на ряде крупных электростанций еще в 40-е годы прошлого столетия были созданы электрохимические производства по получению водорода и кислорода. Это позволило значительно увеличить эффективную мощность электростанции без установки дополнительных мощностей.

Потенциал водорода далеко не исчерпан в традиционной энергетике. По мере успешного реше-

ния проблем хранения водорода и создания высокоэффективных топливных элементов будет реализована абсолютно надежная система резервирования собственных нужд при нештатных режимах работы электростанции. Это позволит отказаться от дорогостоящих систем резервирования на базе дизель-генератора. Несомненно, переход к водородной энергетике принципиально изменит структуру существующих энергетических предприятий.

Опыт первых экспериментов с кислородно-водородными парогазовыми установками показывает, что наиболее предпочтительными становятся агрегаты вертикального типа. Это связано с тем, что на первой ступени водородных силовых установок используются высокооборотные турбины со скоростями вращения выше 20000 об/мин. Очевидно, что в этих условиях наиболее технологичным будет использование электромагнитных систем силовых опор, а, следовательно, применение криогенной техники. Отработанный пар высоких параметров будет использован во втором контуре для привода классической паровой турбины. Поскольку обороты генератора первого контура значительно превышают значения принятые в традиционной энергетике, то их конструкция и системы электрического преобразования будут отличаться от существующих.

Одним из сдерживающих факторов развития водородной энергетики являются существующие технологии хранения (криогенная и балонная) небезопасны и энергоемки.

Гидридный способ хранения пока не нашел широкого распространения, вследствие недостаточной изученности этого вопроса. Гидридные аккумуляторы водорода на основе интерметаллидов редкоземельных элементов и металлов платиновой группы эффективны как накопители, но требуют больших финансовых затрат [1-6]. В последнее время особый интерес за рубежом и в России вызывают работы по

Звягинцева Алла Витальевна - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 89507501062, e-mail: zvygincevaav@mail.ru

использованию для хранения водорода на основе сплавов алюминия с некоторыми переходными металлами. Дальнейшее развитие работ в этом направлении позволит надеяться, что аккумуляторы высокой водородной емкости будут созданы. Решение этой проблемы значительно ускорит процесс внедрения водородной энергетики в производство.

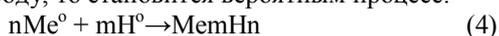
Теория процессов

Материалы данной работы направлены на рассмотрение возможности применения электрохимических систем для аккумуляции водорода. Электролитические металлы и сплавы, в отличие от металлургических, имеют другой механизм взаимодействия.

Во-первых: водород на электроде (катоде) выделяется совместно с образующимися атомами металла согласно уравнениям:



Во-вторых: наличие атомного водорода (реакция 2) повышает вероятность взаимодействия металла с водородом. Если металл катода имеет большое сродство к водороду, то становится вероятным процесс:



где n и m стехиометрические коэффициенты.

В-третьих: образование дефектов структуры, обладающих более высоким потенциалом, в сравнении с атомами, становится возможным при электрокристаллизации металлов. По таким дефектам наиболее вероятно взаимодействие атома водорода. Поэтому процесс наводороживания электрохимических систем отличается от взаимодействия водорода с металлами металлургического производства.

Химическое соединение водорода в форме металлических гидридов представляет привлекательную альтернативу традиционному способу хранения, которому в последнее уделялось большое внимание.

При одновременном восстановлении катиона металла Me^{n+} до атомарного состояния и одновременном разряде катиона H^+ возрастает вероятность образования соединений типа Me-H , так как атом восстановленного металла находится в активной форме. Поэтому, на наш взгляд, наиболее перспективным методом аккумуляции водорода является электрохимический способ восстановления катиона гидроксония из водных растворов электролитов. Исходя из расположения элементов в системе Д.И. Менделеева, можно сделать вывод, что некоторые переходные металлы, например, Ni, Cr, Fe, полученные методом гальваностегии, могут легко взаимодействовать с водородом при их катодном восстановлении [7]. Следует отметить экспериментальные данные, полученные авторами, позволяют сделать заключение, что данные металлы способны образовывать гидриды на катоде при их электрохимическом восстановлении из водных растворов электролитов [8].

В данной работе было установлено, что такая возможность повышенного содержания водорода в

структуре электролитического хрома объясняется повышением концентрации дефектов структуры в единице объема металла. Кроме того, в работе [9] показано, что наличие компонентов некоторых неметаллов, например, бора в электрохимическом композите Ni-B, приводит к увеличению вероятности образования гидридных соединений в структуре металлов.

Металлические гидриды - можно рассматривать как металлические сплавы с водородом, эти соединения отличаются высокой электропроводностью, как и материнские металлы. Металлогидриды образуют почти все переходные металлы. Практически все металлогидриды требуют высоких температур для дегидрирования (реакции отдачи водорода).

Вопрос взаимодействия металлов с водородом следует рассматривать в непосредственной взаимосвязи со структурой металла и механизмом образования его водородных соединений. В более ранних работах [7] было установлено, что водород взаимодействует с электролитическими металлами по дефектам структуры. При этом следует иметь в виду, что под дефектом структуры подразумеваются такие структурные объекты, как межзеренные границы, выход на поверхность дислокаций. Энергетический потенциал дефекта может сильно различаться по своей величине, который и определяет вероятность взаимодействия его с водородом. В связи с особенностями формирования структуры электролитических металлов возникает вопрос о различном характере образования связей металл-водород, а, следовательно, о различной прочности связей Me-H .

Исследования возможности электрохимических систем к поглощению водорода проводили по двум направлениям: 1. Формирование структуры металла и сплава с определенной степенью дефектности; 2. Дополнительное введение водорода в металлическую матрицу.

Результаты эксперимента и их обсуждение

В настоящее время алюминий широко используется во многих отраслях человеческой деятельности. Теперь этот универсальный металл может найти применение еще в одной области - в качестве аккумулятора водорода, которым будут питаться топливные элементы, приводящие в действие электрические водородные автомобили и летательные аппараты. Была изучена возможность электролитического наводороживания алюминиевых образцов с целью определения возможности взаимодействия алюминия с водородом. Получены результаты измерения температурной зависимости внутреннего трения алюминиевой фольги толщиной 16 мкм и отожженной при 400 °С. На рис. 1. представлена зависимость $Q^{-1} = f(T)$ для Al фольги. Из данных рис. 2. следует, что на

кривой температурной зависимости внутреннего трения при температуре 300 °С наблюдается зернограничный пик (частота колебаний образца 100 Гц). Фон внутреннего трения $5 \cdot 10^{-4}$. Анализ данных, представленных в [10-13], показывает, что для массивных образцов, фон внутреннего трения составляет 10^{-3} и пик наблюдается в диапазоне температур +250 - +350 °С. Эти результаты достаточно хорошо согласуются, если принять во внимание, что температура зернограничного пика алюминия чувствительна к размеру зерна, чистоте металла, термической обработке.

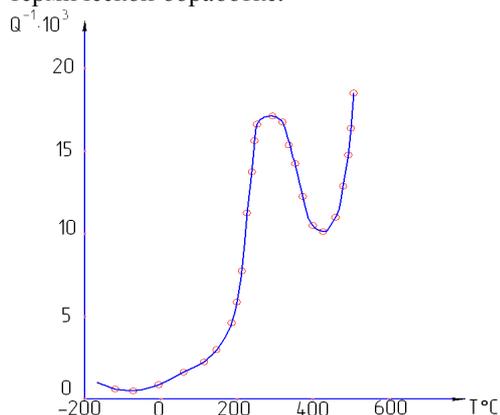


Рис. 1. Температурная зависимость внутреннего трения алюминиевой фольги, отожженной при 400 °С

Экспериментальные данные работы [8] и предположение о том, что дефекты структуры могут служить местами включения водорода в структуру металла, согласуются. В данном случае на основании рис. 2 можно считать, что их наличие в структуре металла допустимо до температуры $\sim +350$ °С, и по этим дефектам возможно образование связи Al-H.

Авторами данной публикации также проведены исследования процессов хромирования. На рис. 2 представлены результаты измерения $Q^{-1}(T)$ электролитического хрома.

При температуре ~ -14 °С обнаружен широкий максимум внутреннего трения (А), который при увеличении частоты колебаний образца ($\sim 100 \div 1000$ Гц.) смещается в сторону более высоких температур. Энергия активации этого пика, определялась методом частотного сдвига пика и была рассчитана по приведенной ниже формуле (5), равна 0,6 эВ:

$$\Delta H = \frac{RT_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{f_1}{f_2}, \quad (5)$$

где ΔH - энергии активации H релаксационных процессов, вызывающих появление пиков на кривой $Q(T)$; T_1, f_1 - соответственно абсолютная температура и частота колебаний образца, при которых по модели Зинера возникает пик на кривой добротности $Q(T)$; T_2 и, f_2 - температура и частота, соответствующие максимуму добротности при смещении частоты колебаний образца от значения f_1 до значения f_2 ; R - универсальная газовая постоянная.

С ростом температуры отжига (кр. 2, 3, 4) фон Q^{-1} электролитического хрома падает и при 900 °С

достигает величины $5 \cdot 10^{-5}$. В области низких температур в отожженных образцах электролитического хрома на кривых $Q^{-1}(T)$ наблюдается небольшой максимум, который не исчезает при отжиге 1200 °С.

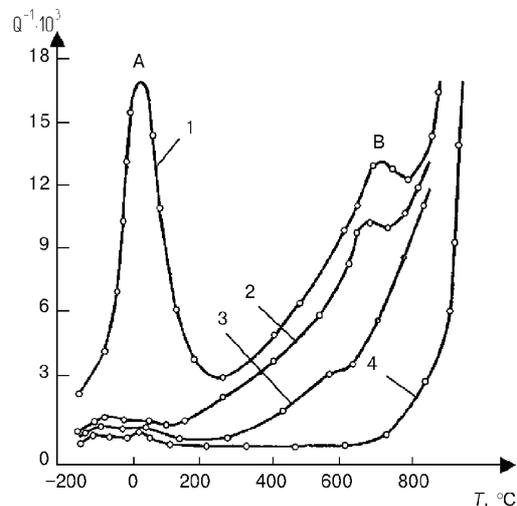


Рис. 2. Температурная зависимость внутреннего трения электролитического хрома, полученного из стандартного электролита: хром после осаждения; 2- хром после отжига при 200°С в течение 1 часа; 3 - хром после отжига при 400 °С в течение 1 часа; 4 - хром после отжига при 900 °С в течение 1 часа

Энергия активации этого пика была определена по его положению на оси температур [11] и оказалась, равной 1,65 эВ:

$$\Delta H = RT \ln \frac{KT}{h\omega}, \quad (6)$$

где ω - круговая частота колебаний при температуре пика; h - постоянная Планка.

Анализируя зависимости, приведенные на рис. 2, можно установить, что содержащийся в электролитическом хrome водород легко выделяется при нагревании и при температуре 400 °С водорода в хrome практически не остается.

Максимум $Q^{-1}(T)$ из температурной зависимости внутреннего трения электролитического хрома полностью исчезает после отжига в вакууме при 150 - 200 °С. Эта температура как раз соответствует удалению из электролитического хрома до 80 % водорода [12].

Экспериментальная полуширина пика Q^{-1} определялась из соотношения:

$$\Delta \left(\frac{1}{T} \right)_{ЭК} = \frac{1}{T_L} - \frac{1}{T_H}, \quad (7)$$

где T_L и T_H - абсолютные температуры, соответствующие значениям точкам на полуши-

рине максимума $Q_m^{-1}/2$ с левой и правой стороны от Q_m^{-1} .

Полученные значения сравнивали с расчетными величинами, определенными по формуле простого релаксационного процесса [13]:

$$\Delta\left(\frac{1}{T}\right)_{расч} = \frac{K}{\Delta H} = \frac{K}{\Delta H} \ln\left(\frac{2 + \sqrt{3}}{2 - \sqrt{3}}\right), \quad (8)$$

где K – постоянная Больцмана; ΔH – энергия активации.

Таким образом, ширина пика $\Delta\left(\frac{1}{T}\right)_{расч}$ обратно пропорциональна энергии активации ΔH , что делает возможным произвести оценку энергии активации по температурной зависимости внутреннего трения. Анализ полученных данных показал, что ширина пика зависимости $Q^{-1} = f(T)$ электролитического хрома для данного процесса релаксации в (3 ÷ 4 раза) превышает расчётную величину. По-видимому, в электролитическом хроме наблюдается наложение процессов восходящей диффузии атомов водорода, хаотично расположенных на дефектах кристаллической решетки. Степень насыщенности валентных связей атомов хрома, находящихся на локальных искажениях решетки, различна, а, следовательно, неодинакова их способность к взаимодействию с атомами водорода. В результате энергии активации (ΔH) диффузии водорода имеет не одно значение, а целый ряд сравнительно близких значений. Диффузия водорода характеризуется определенным спектром τ , что очевидно, и является причиной расширения пика внутреннего трения на кривой $Q^{-1} = f(T)$ электролитического хрома. Согласно проведенным экспериментальным данным водород удаляется из металла при низкотемпературном отжиге (200 °С), поэтому хромовые покрытия могут быть использованы в качестве аккумуляторов топлива. При этих температурах дефекты структуры электролитических осадков хрома исчезают, и, следовательно, сохраняется возможность вторичного наводороживания металлических структур электрохимическим способом.

Одним из доказательств теории природы связи в системе водород-металл, определяющей основную форму химической связи как гидридную, служит анализ зависимостей количества поглощенного водорода в образцах композита никель-бор, подвергнутых «старению» [14]. Последующая экстракция водорода из образцов показала, что наиболее заметные изменения структуры и свойств покрытия происходит в образцах в течение 24 часов после электролиза (рис. 3). Проведенные исследования согласуются с литературными данными: при поглощении водорода никелевым покрытием происходит образование гидрида, распадающегося при низкой температуре 46 °С с выделением водорода: $3NiH_2 \rightarrow Ni + 2NiH + 2H_2$ [4]. Очевидно, аналогичное явление наблюдается в композите Ni-B. Анализируя данные рис. 3 можно предположить, что эффект самопроизвольного «течения» водорода из металла обусловлен наличием большого числа связей Me-H, имеющих незначительную энергию разрыва связи. Следовательно, по окончании электролиза часть водорода может выйти

из композита Ni-B в условиях комнатной температуры, так как образованные гидриды нестабильны и имеют малую энергию связи.

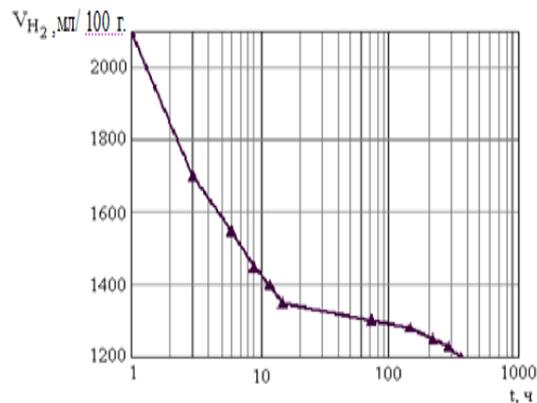


Рис. 3. Зависимость содержания водорода в образцах композита Ni-B-H от времени «старения»

Следует отметить особое влияние бора на образование связей Me-H с малой энергией. По-видимому, деформация кристаллической решетки за счёт внедрения атомов бора, может изменяться в течение короткого времени, что способствует изменению степени деформации решетки никеля. Поскольку водород локализуется по дефектам структуры, то релаксирующие дефекты и являются основной причиной свободного «течения» водорода. В соответствии с экспериментальными данными можно предположить, что релаксация внутренних напряжений в окрестности структурных дефектов композита Ni-B носит затухающий во времени характер. Следовательно, с увеличением времени «старения» происходит более полная нормализация структуры композитов. Этот факт служит подтверждением наших выводов о том, что взаимодействие водорода с металлами наиболее вероятно по дефектам металлической структуры. Анализируя вышесказанное, можно предположить, что эффект самопроизвольного «течения» водорода из металла обусловлен наличием большого числа связей H-Me, имеющих очень малую энергию разрыва. Число таких дефектов в композите Ni-B в несколько раз превосходит их количество в образцах из чистого никеля. По-видимому, бор, образуя с электролитическим никелем раствор внедрения, вносит микроискажения в его кристаллическую решетку. По местам таких искажений дислоцируются атомы водорода, образуя соединения с никелем и бором. В результате «временной» релаксации структуры композита и очень малой энергии связи Me-H и возникает вышеописанное явление «течения» водорода. Аномально большое количество водорода, поглощаемое композита Ni-B, можно объяснить также возможностью образования

дополнительных связей водорода с бором [15-18].

$$D_k = D_c \cdot \exp(\Delta E/k \cdot \Delta T). \quad (10)$$

В отличие от чистого никеля особенностью формирования систем никель-бор является то, что скорость возникновения зародышей превалирует над скоростью их роста, и образование новых зерен идет непрерывно по мере пассивирования поверхности растущего осадка бором. Это вызывает уменьшение размера образующихся кристаллитов и увеличение их концентрации на поверхности. Это свидетельствует о возможности формирования структур с наибольшим числом дефектов в единицу объема металла за счет наличия в них структурных и примесных ловушек [15, 16]. Под структурными ловушками понимают дефекты кристаллического строения: дислокации, дисклинации, границы зерен. Примесные ловушки представляют собой примеси замещения малого атомного радиуса по сравнению с основным металлом (например, примеси бора в никеле). Ловушки различных типов взаимодействуют с атомами водорода.

Возможности электрохимических систем на основе никеля по обратимой сорбции водорода рассматривались с учетом полей напряжения, создаваемых структурными дефектами. При описании диффузионных процессов при наличии примесных атомов выбрана модельная система - цилиндрические оболочки (полые цилиндры) и рассмотрена диффузия атомов водорода через цилиндрическую оболочку с примесными и структурными ловушками в работе [16, 17]. Структурными ловушками рассматривали дефекты кристаллического строения: дислокации, дисклинации, границы зерен. Примесными ловушки считали примеси замещения малого атомного радиуса по сравнению с основным металлом (например, примеси бора в никеле). Ловушки различных типов взаимодействуют с атомами водорода. Такое взаимодействие имеет свои характерные особенности. Структурные ловушки (например, краевые дислокации) захватывают атомы водорода на длительное время путем образования водородных сегрегаций или гидридных фаз. Захваченные атомы водорода выбывают из игры и не принимают участие в диффузионных процессах. Примесные ловушки осуществляют захват атомов водорода на некоторое время вследствие образования малоподвижных комплексов. Через некоторое время (особенно при повышении температурах) комплексы распадаются, и свободный атом водорода встречает новую примесную ловушку в виде примеси замещения малого ионного радиуса. В макроскопическом масштабе наблюдают замедление процесса диффузии. Коэффициент диффузии комплекса определяется соотношением [16]:

$$D_k = (D_H \cdot D_c) / (D_H + D_c) \cdot \exp(\Delta E/k \cdot \Delta T), \quad (9)$$

где D_k - коэффициент диффузии комплекса, D_H - коэффициент диффузии атома водорода, D_c - коэффициент диффузии атома примеси, ΔE - энергия связи комплекса, k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура. Если $D_H \gg D_c$, то соотношение (1) принимает вид:

Приведенное неравенство всегда выполняется для атомов водорода (особенно при понижении температуры). Поэтому коэффициент диффузии комплекса «атом водорода – примесь замещения малого атомного радиуса» зависит только от энергии связи двух атомов. Определение этой энергии представляет самостоятельную задачу и в статье не рассматривается. Возможно также экспериментальное определение этой величины (например, использование метода внутреннего трения).

Впервые возможность дополнительного введения водорода в электрохимическую систему рассмотрена в работе [19, 20]. В данных работах методом электролитического осаждения изготовлены композиционные материалы системы Ni-In и изучены температурные диапазоны десорбции ионно-имплантированного дейтерия в зависимости от соотношения компонент и дозы имплантированного дейтерия. Принципиально была использована система не склонная к окклюзии водорода, и решали задачу не традиционным методом, как принято в классической электрохимии. Подбирали состав электролита по данным исследования структуры формируемого покрытия. Структура анализировалась на сканирующем зондовом микроскопе Solver P47. Рентгеноструктурные исследования образцов проводили на дифрактометре HZG-4 в $\text{CuK}\alpha$ -излучении (β -фильтр). Результатами сканирования являются: изображение поверхности в виде фазового контраста, профилограмм по осям x и y и гистограмм распределения неровностей (шероховатости) поверхности. Соответственно с определением фазового состава образцов. Содержание компонентов в композите Ni-In определялось рентгенофлуоресцентным методом.

В данных работах методом электролитического осаждения изготовлены композиционные материалы системы Ni-In и изучены температурные диапазоны десорбции ионно-имплантированного дейтерия в зависимости от соотношения компонент и дозы имплантированного дейтерия. На основании проведенных исследований подобран состав электролита с оптимальным содержанием сульфата индия $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3$ в электролите, который позволяет получать более мелкокристаллические и равнотельные Ni-In композиты с фазовым составом - $\text{Ni}_{70}\text{In}_{30}$. При использовании концентрации $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3$ в электролите 4 г/л получились образцы со стехиометрией $\text{Ni}_{70}\text{In}_{30}$. Увеличение концентрации индия в композитах (более 30 мас. % In) сопровождается появлением и ростом интенсивности дополнительных линий на дифрактограммах. Это связано с образованием интерметаллидов Ni_3In и In_2Ni о возможности образования, которых свидетельствует фазовая

диаграмма системы Ni-In. Далее в электрохимический композит методом ионной имплантации вводили изотоп водорода – дейтерий. Внедрение дейтерия в образцы производилось имплантацией ионов дейтерия энергии 12 кэВ дозами в пределах $3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{18}$ ат.Д/см². Результаты исследований показали, что структура спектра ТДС дейтерия является функцией имплантационной дозы.

Выводы

Таким образом, по нашим данным, водородная проницаемость никеля при наличии интерметаллидов индия в никеле уменьшается, так как в окрестности интерметаллида индия могут возникать напряжения растяжения и водород сегрегируется на границе этих соединений. В своей работе мы показали, что возможности электрохимических систем еще не изучены. Одним из важных элементов формирования электрохимических систем, обладающих способностью окклюдовать водород с последующим образованием металл-гидридных фаз, является создание структурных и примесных ловушек для атомов водорода. Взаимосвязь структуры, состава электрохимических композитов, способных хранить имплантированный изотоп водорода – дейтерий и возможность его десорбции при невысоких температурах является целью наших дальнейших исследований.

По результатам обсуждения и данным эксперимента, используя метод внутреннего трения для исследования образцов на основе алюминия, хрома и никеля, нам удалось установить:

1. Взаимодействие водорода с металлом, главным образом, происходит по дефектам структуры образца. При удалении этих дефектов в результате отжига водородный пик на кривой внутреннего трения исчезает.

2. Легирующие добавки, включаемые в основу структуры металла, создающие дополнительные потенциальные ямы для закрепления водорода, способствуют увеличению количества поглощаемого газа; при этом энергия связи Me-H должна изменяться в достаточно широких пределах. Создавая многокомпонентные композиты, можно получать водородные контейнеры с регулируемым выходом водорода при изменении температуры.

Работа выполнена на основе гранта по программе У.М.Н.И.К. 2015, полученного от Федерального государственного бюджетного учреждения «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям).

Литература

1. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение [Текст]: справ. изд. /Д.Ю. Гамбург, В.П. Семенов, Н.Ф. Дубовкин, Л.Н. Смирнов //Под ред. Д.Ю. Гамбурга, Н.Ф. Дубовкина. - М.: Химия, 1989. - 672 с.
2. Oudriss A. Grain size and grain-boundary effects on diffusion and trapping of hydrogen in pure nickel [Текст] /A. Oudriss, J. Creus, J. Bouhattate, E. Conforto, C. Berziou, C.

Savall, X. Feugas //Acta Materialia. - 2012. - № 60. - PP. 6814-6828.

3. Судзуки К. Аморфные металлы: монография [Текст] /К. Судзуки, Х. Фудзимори, К. Хасимото. - М.: Металлургия, 1987. - 328 с.

4. Fromm E. Surface phenomena in hydrogen absorption kinetics of metals and intermetallic compounds [Текст] / E. Fromm, H. Uhcida //J. of Less-Common Metals. - 1987. - V. 131. - PP. 1-12.

5. Chene I. Contribution of cathodic charging to hydrogen storage in metal hydrides [Текст] / I. Chene //J. of Less-Common Metals. - 1987. - V. 131. - PP. 337-347.

6. Libowitz G.G. Hydride formation by BCC solid solution alloys [Текст] / G.G. Libowitz, A.J. Maeland //Materials Science Forum. - 1988. - V.31. - PP. 176-196.

7. Поветкин В.В. [Текст] /В.В. Поветкин, И.М. Ковенский //Структура электролитических покрытий. - М.: Металлургия, 1989. - 136 с.

8. Гранкин Э.А. Зависимость внутреннего трения электролитического хрома от режимов электрокристаллизации [Текст] /Э.А. Гранкин, Ю.Н. Шалимов, Е.Н. Островская //Альтернативная энергетика и экология. - 2004.- № 7. - С. 12-18.

9. Zvyagintseva A.V. Interaction peculiarities of hydrogen and Ni-B galvanic alloys [Текст] /A.V. Zvyagintseva //Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems. – Springer, 2008. - PP. 437- 442.

10. Новик А. Релаксационные явления в кристаллах [Текст] /А. Новик, Б. Берри //Под ред. Э.М. Надгорного, Я.М. Сойфера. - М.: Атомиздат, 1975. - 472 с.

11. Криштал М.А. Внутреннее трение в металлах и сплавах [Текст] /М.А. Криштал, Ю.В. Пигузов, С.А. Головин. - М.: «Металлургия», 1964. - 246 с.

12. Классические и альтернативные подходы к взаимодействию водорода с металлами при электрохимическом восстановлении на катоде [Текст] /Ю.Н. Шалимов, А.Л. Гусев, Ю.В. Харченко, Е.Л. Литвинов, В.И. Кудряш //Альтернативная энергетика и экология.- 2007.- № 8(52). - С. 35-42.

13. Александров Л.Н. Внутреннее трение и физические свойства тугоплавких металлов [Текст] /Л.Н. Александров, В.С. Мордюк. - Саранск: Мордов. кн. изд-во, 1965. - 250 с.

14. Zvyagintseva A.V. On the Stability of Defects in the Structure of Electrochemical Coatings [Текст] /A.V. Zvyagintseva, Yu.N. Shalimov //Surface Engineering and Applied Electrochemistry. - 2014. - Vol. 50. - No. 6. - PP. 466-477.

15. Звягинцева А.В. Зависимость процессов взаимодействия металлов с водородом от структуры электрохимических систем [Текст] /А.В. Звягинцева //Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Серия «Биология, химия». -2013. - Том 26 (65). - № 4. - С. 259-269.

16. Власов Н.М. Математическое моделирование водородной проницаемости металлов [Текст]: монография /Н.М. Власов, А.В. Звягинцева. - Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВГТУ», 2012. - 248 с.

17. Звягинцева А.В. Определение водородной емкости структурных дефектов [Текст] / А.В. Звягинцева //Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». - Саров: НТЦ «ТАТА».- 2015. - №21 (185). - С. 145-149.

18. Звягинцева А.В. Способность материалов

на основе никеля наноразмерного диапазона к аккумулярованию водорода [Текст] /А.В. Звягинцева //Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». - Саров: НТЦ «ТАТА». - 2015. - №21 (185). - С. 150-155.

19. Zvyginceva A.V. Effects of deuterium concentration on deuterium desorption temperature range from Ni-In composites [Текст] /A.V. Zvyginceva, O.M. Morozov, V.I. Zhurba, V.O. Prokolaieva //Scientific Journal. Proceedings of the international conference. Nanomaterials: applications and properties. - 2013. - Vol. 2. - No 1. - 01NTF37(3pp).

20. Звягинцева А.В. Температурные интервалы десорбции дейтерия из Ni–In композитов [Текст] /А.В. Звягинцева, А.Н. Морозов, И.М. Кирьян //Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. ИИИМ '14. Сборник докладов Пятой Международной конференции и Девятой Международной школы молодых ученых и специалистов им. А.А. Курдюмова //Под ред. Д-ра техн. наук А.А. Юхимчука. Саров: ФГУП «РФЯЦ–ВНИИЭФ», 2015. - С. 106-119.

Воронежский государственный технический университет

PROSPECTS FOR DEVELOPMENT OF ALTERNATIVE SOURCES OF ENERGY: HYDROGEN IN METALS AND ALLOYS, OBTAINED BY THE ELECTROCRYSTALLISATION METHOD

A.V. Zvyagintseva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: zvygincevaav@mail.ru

Potential possibilities for hydrogen storage by using some electrochemical systems (aluminum, chromium, nickel, nickel-boron), are considered. The possibilities of formation of hydrides of metals at their cathodic restoration at parallel reactions of a cation of Me^{n+} и H^+ are discussed in this paper. It is established, that such interaction is caused by a possibility of introduction of atom of hydrogen and by its localization in structure of metal, and by ability of formation of hydrides on defects of structure of metal. It is shown that the energetic of processes of interaction of metal with hydrogen in technologies of metallurgy and electrodepositing are different therefore we discussed some of the mechanisms of interaction of hydrogen with the electrolytic metals and alloys. The exclusive role of defects of structure on which formation of $Me - H$ communications is possible is noted. It is established that steady defects can be used for the accumulation of hydrogen in the form of hydrides

Key words: metal hydride, structural defects, internal friction, hydrogen reduction potential, electrochemical systems, ion-implanted deuterium

References

1. Hamburg Yu., Semenov V. P., Dubovkin N. F., Smirnov L. N. Vodorod. Svoystva, poluchenie, hranenie, transportirovanie, primenenie [Properties, production, storage, transportation, use]. Under the editorship of Yu. Hamburg, N. F. Dubovkin. - M.: Chemistry, 1989. - 672 pages.
2. Oudriss A., Creus J., Bouhattate J., Conforto E., Berziou C., Savall C., Feugas X. Grain size and grain-boundary effects on diffusion and trapping of hydrogen in pure nickel //Acta Materialia. - 2012. - No. 60. - PP. 6814-6828.
3. Suzuki K. Fujimori H., Hashimoto K. Amorfnye metally: monografija [Amorphous metals: monograph].- M.: Metallurgy, 1987. - 328 pages.
4. Fromm E., Uhcida H. Surface phenomena in hydrogen absorption kinetics of metals and intermetallic compounds // J. of Less-Common Metals. - 1987. - V. 131. - PP. 1-12.
5. Chene I. Contribution of cathodic charging to hydrogen storage in metal hydrides // J. of Less-Common Metals. - 1987. - V. 131. - PP. 337-347.
6. Libowitz G.G., Maeland A.J. Hydride formation by BCC solid solution alloys //Materials Science Forum. - 1988. - V.31. - PP. 176-196.
7. Povetkin V. V., Kovensky I. M. Structure of the electrodeposited coatings. - M.: Metallurgy, 1989. - 136 pages.
8. Grankin E. A. Zavisimost' vnutrennego trenija jelektroliticheskogo hroma ot rezhimov jelektrokristallizacii [The dependence of the internal friction of electrolytic chrome on modes of electro crystallization] //The Alternative power engineering and ecology. - 2004. - No. 7. - C. 12-18.
9. Zvyagintseva A.V. Interaction peculiarities of hydrogen and Ni-B galvanic alloys // Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems. – Springer, 2008. - PP. 437-442.
10. Novik A., Berri B. Relaksacionnye javlenija v kristallah [Relaxation phenomenon in crystals]; pod red. E. M. Nadgorny, Ya. M. Soyfer. - M.: Atomizdat, 1975. - 472 pages.

11. Krishtal M. A., Piguzov Yu. V., Golovin S. A. Vnutrennee trenie v metallah i splavah [Internal friction in metals and alloys] [Internal friction in metals and alloys]. - M.: "Metallurgy", 1964. - 246 pages.
12. Shalimov Yu.N., Gusev A. L., Harchenko Yu. V., Litvinov E. L., Kudryash V. I. Klassicheskie i al'ternativnye podhody k vzaimodejstviyu vodoroda s metallami pri jelektrohimičeskom vosstanovlenii na katode [Classical and alternative approaches to the interaction of hydrogen with metals in the electrochemical recovery at the cathode] // Al'ternativnaja jenergetika i jekologija [Alternative power engineering and ecology]. - 2007. - No. 8(52). - Page 35-42.
13. Alexandrov L.N., Mordjuk V. S. Vnutrennee trenie i fizicheskie svojstva tugoplavkih metallov [Internal friction and physical properties of refractory metals].- Saransk: Mordov. Book publishing house, 1965. - 250 pages.
14. Zvyagintseva A.V., Shalimov Yu.N. On the Stability of Defects in the Structure of Electrochemical Coatings // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. - 2014. - Vol. 50. - No. 6. - PP. 466–477.
15. Zvyagintseva A. V. Zavisimost' processov vzaimodejstvija metallov s vodorodom ot struktury jelektrohimičeskih sistem [The dependence of the interaction of metals with hydrogen from the structure of electrochemical systems] // Uchenye zapiski Tavricheskogo nacional'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo. Serija «Biologija, himija» [Scientists of a note of the Taurian national university of V. I. Vernadsky. Biology, Chemistry series]. - 2013. - Volume 26 (65). - No. 4. - Page 259-269.
16. Vlasov N. M., Zvyagintseva A. V. Matematičeskoe modelirovanie vodorodnoj pronicaemosti metallov [Mathematical modelling of hydrogen permeability of metals]: monograph. - Voronezh: FGBOU VPO of "VGTU", 2012. - 248 pages.
17. Zvyagintseva A. V. Opredelenie vodorodnoj emkosti strukturnyh defektov [Determination of hydrogen capacity of structural defects of [Determination of hydrogen capacity of structural defects] // Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal Al'ternativnaja jenergetika i jekologija [International scientific magazine The Alternative Power Engineering and Ecology]. - Sarov: STC TATA.-2015. - No. 21 (185). - Page 145-149.
18. Zvyagintseva A. V. Sposobnost' materialov na osnove nikelja nanorazmernogo diapazona k akumulirovaniju vodoroda [The ability of the materials based on Nickel nano-scale range for hydrogen storage] // Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal Al'ternativnaja jenergetika i jekologija [International scientific magazine The Alternative Power Engineering and Ecology]. - Sarov: STC TATA. - 2015. - No. 21 (185). - Page 150-155.
19. Zvyginčeva A.V., Morozov O.M., Zhurba V.I., Progolaieva V.O. Effects of deuterium concentration on deuterium desorption temperature range from Ni-In composites // Scientific Journal. Proceedings of the international conference. Nanomaterials: applications and properties. - 2013. - Vol. 2. - No 1. - 01NTF37(3pp).
20. Zvyagintseva A.V., Morozov A. N., Kiryan I. M. Temperaturnye intervaly desorbčii dejtterija iz Ni–In [Temperature range desorption deuterium from Ni–In composites] // Vzaimodejstvie izotopov vodoroda s konstrukcionnymi materialami. IHISM'14. Sbornik dokladov Pjatoj Mezhdunarodnoj konferencii i Devjatoj Mezhdunarodnoj shkoly molodyh učenyh i specialistov im. A.A. Kurdjumova [Interaction of isotopes of Hydrogenium with constructional materials. IHISM'14. The collection of reports of the Fifth International conference and the Ninth International school of young scientists and experts of A. A. Kurdjumov]; pod red. A. Yukhimčuka. Sarov: Federal State Unitary Enterprise RFYaTs-VNIIEF, 2015. – P. 106-119.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Для публикации материалов в журнале авторам необходимо представить.

1. Рукопись общим объемом до 0,5 п.л. (краткое сообщение до 0,1 п.л.) следует представить в 2-х экземплярах на формате А4, отпечатанную шрифтом Time New Roman Cyt через 1 интервал и на диске (в редакторе Word for Windows), с аннотацией и ключевыми словами (не менее 3, не более 5 слов) (на русском и английском языках), включающих в себя английский перевод названия статьи, Ф.И.О. авторов (английский перевод приводится на последней странице). Форматирование статьи для издания в "Вестнике" производить по форме, аналогичной принятой Международной академической издательской компанией "Наука" (см., например, "Журнал неорганической химии" РАН и др.). Наличие в статье не полностью заполненных страниц не допускается. Статья должна быть подписана авторами на одном экземпляре. Разрешение на публикацию (письмо или экспертное заключение о возможности открытого опубликования) должно быть заверено печатью и подписью ответственного лица.

2. Страницы должны иметь следующие размеры полей: верхнее - 2,5 см; нижнее - 2 см; правое - 2 см; левое - 2 см. На первой странице текста располагают УДК (в левом верхнем углу листа от поля, размер шрифта 11). Название статьи (заглавными буквами, размер шрифта 11), инициалы и фамилию автора (авторов) (размер шрифта 11) по центру; аннотацию (не более 8 строк, размер шрифта 9); ключевые слова (не менее 3, не более 5 слов). Аннотация и ключевые слова должны располагаться с отступом 0,8 см от левого края. Далее следует текст статьи, формулы (размер шрифта 10) и цитируемая литература (размер шрифта 9). Текст статьи и цитируемую литературу представляют на листе в две колонки шириной по 8 см каждая (межколоночное расстояние 1 см). На последней странице (после литературы) должны быть указаны организация и английский перевод, не отделяемые от основного текста. В конце первой страницы слева под чертой - краткие сведения об авторе (авторах) (фамилия, имя, отчество полностью, место работы, ученая степень и звание, телефон или E-mail, с размером шрифта 9). Краткие сведения об авторах должны представлять собой обычную сноску редактора Word for Windows без символа, которая приводится в начале первого абзаца первой колонки статьи.

3. На отдельном листе следует приложить служебные и домашние адреса (с почтовым индексом), телефоны авторов статьи.

4. Таблицы располагаются по тексту. Каждый элемент таблицы должен представлять собой отдельную ячейку. Не допускается размещать колонку или строку с данными в одной ячейке! Если в статье одна таблица, то слово "Таблица" в названии не пишется. Если в статье несколько таблиц, то над названием таблицы справа пишут "Таблица 1(2,3 и т.д.)". Ссылка на таблицу оформляется следующим образом: "табл. 1(2,3 и т.д.)".

5. Оформление рисунков в формате BMP. Подписанные рисунки не входят в состав рисунков, а располагаются отдельным текстом с размером шрифта 9 под рисунком. Рекомендуемая ширина рисунков - не более ширины колонки. Буквы и цифры на рисунке должны быть разборчивы. Тоновые фотографии предоставляются в двух экземплярах на белой глянцевой фотобумаге, без пояснительных надписей (стрелок, обозначений и пр.) на одной из этих фотографий. Если в статье несколько рисунков, то перед названием пишут "Рис. 1 (2, 3 и т.д.)". Ссылку на рисунок оформляют следующим образом:

"рис. 1(2.3 и т.д.)". Если в статье один рисунок то слово "Рис." под рисунком опускают.

6. Абзацный отступ, равный 0,8 см. должен начинаться после ввода (автоматически). Не допускается формирование абзацного отступа при помощи пробелов и табуляции!

7. Используемые в работе термины, единицы измерения и условные обозначения должны быть общепринятыми. Все употребляемые авторами обозначения (за исключением общеизвестных констант типа e, h, c и т.п.) и аббревиатуры должны быть определены при их первом упоминании в тексте.

8. Формулы нумеруют в круглых скобках (2), подстрочные примечания - арабскими цифрами.

9. Все литературные ссылки в материале должны быть указаны в квадратных скобках - [1]. В конце материала ссылка должна быть расшифрована в следующем виде:

для статей: авторы; название статьи, издательство, год, том, номер (выпуск), страницы;

для монографий: список авторов; название, издательство, год, общее количество страниц.

Материалы представляются по адресу: Россия, 394026, г. Воронеж, Московский пр-т, 14.
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», к. 211
Редакция журнала «Вестник Воронежского государственного технического университета»
Тел.: 8 (473)2783-889; E-mail: vestnik@vorstu.ru

Формат 60x84/8. Бумага писчая.
Усл. печ. л. 13,1. Уч.-изд. л. 15,4.
Тираж 500 экз. Заказ № 111.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14