

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ"

ISSN 2079-5459

Збірка наукових праць

33'2012

Серія "Нові рішення в сучасних технологіях"

Видання засноване Національним технічним університетом «ХПІ» в 2001 году

Держвидання

Свідцтво Держкомітету з інформаційної політики

України КВ №5256 від 02.07.2001 р.

КООРДИНАЦІЙНА РАДА

Голова

Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.

Секретар координаційної ради

К.О. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц.

Координаційна рада

А.П. Марченко, д-р техн. наук, проф.;
Є.І. Сокол, чл.- кор. НАН України, проф.;
Є.Є. Александров, д-р техн. наук, проф.;
А.В. Бойко, д-р техн. наук, проф.;
М.Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.;
А.І. Грабчєнко, д-р техн. наук, проф.;
В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.;
В.Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.;
І.Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.;
В.В. Єпіфанов, канд. техн. наук, проф.;
Ю.І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.;
П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.;
В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.;
С.І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.;
В.М. Кошельник, д-р техн. наук, проф.;
В.І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.;
Г.В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.;
В.С. Лупіков, д-р техн. наук, проф.;
О.К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.;
В.І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.;
В.А. Пуляев, д-р техн. наук, проф.;
В.Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.;
Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.;
Ю.В. Тимофєєв, д-р техн. наук, проф.;
М.А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Ответственный редактор

Є.І. Сокол, чл.- кор. НАН України, проф.

Відповідальний секретар

Івахненко А.В. ст.викладач,
Коворотний Т.Л., асистент.

Члени редколегії

Г.І. Львов, д-р техн. наук, проф.;
О.С. Куценко, д-р техн. наук, проф.;
Л.Г. Раскін, д-р техн. наук, проф.;
В.Я. Заруба, д-р техн. наук, проф.;
В.Я. Терзіян, д-р техн. наук, проф.;
М.Д. Узунян, д-р техн. наук, проф.;
Л.Л. Брагіна, д-р техн. наук, проф.;
В.І. Шустіков, д-р техн. наук, проф.;
В.І. Тошинський, д-р техн. наук, проф.;
Р.Д. Ситнік, д-р техн. наук, проф.;
В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.;
В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.;
Н.Н. Олександров, д-р техн. наук, проф.;
В.Т. Долбня, д-р техн. наук, проф.;
Б.В. Кліменко, д-р техн. наук, проф.;
П.Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.;
М.І. Погорелов, канд. екон. наук, проф.

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ

61002, Харків, вул. Фрунзе, 21 НТУ
«ХПІ», РМУС Тел. (057) 707-60-40

Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць.
Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях.- Харків: НТУ «ХПІ» -
2012. - №33 - 160с.

В сборнике представлены теоретические и практические результаты научных исследований и разработок, которые выполнены преподавателями высшей школы, аспирантами, научными сотрудниками, специалистами различных организаций и предприятий.

Для научных работников, преподавателей, аспирантов, специалистов

У збірнику представлені теоретичні та практичні результати наукових досліджень та розробок, що виконані викладачами вищої школи, аспірантами, науковими співробітниками, спеціалістами різних організацій та підприємств.

Для наукових співробітників, викладачів, аспірантів, спеціалістів

Друкується за рішенням Вченої ради НТУ „ХПІ”, Протокол №7 від 06.07.2012

Національний технічний університет „ХПІ” 2012

УДК 629.463.001.63

О.В. ФОМИН, канд. техн. наук, доц., ДонІЗТ, Донецьк

СУЧАСНІ ВИМОГИ ДО КОНСТРУКЦІЙ ЗАЛІЗНИЧНИХ НАПІВВАГОНІВ, ЯКІ ПРОЕКТУЮТЬСЯ ЧИ МОДЕРНІЗУЮТЬСЯ

В статті представлено сучасні вимоги які необхідно враховувати при проектуванні нових чи модернізації вже існуючих конструкцій залізничних напіввагонів.

Ключові слова: вагонобудування, проектування, вимоги до конструкції.

В статье представлены современные требования которые необходимо учитывать при проектировании новых или модернизации уже существующих конструкций железнодорожных полувагонов.

Ключевые слова: вагоностроение, проектирование, требования к конструкции.

In the article modern requirements are presented which must be taken into account at planning of new or modernization already existent constructions of railway freight gondolas

Keywords: carriage building, planning, requirements to the construction.

Постановка проблеми і аналіз результатів останніх досліджень

Основний принцип діяльності залізничного транспорту України – збереження та нарощування його потенціалу, зміцнення позицій на ринку транспортних послуг, впровадження нових технологій і забезпечення конкурентоспроможності. Для реалізації цього принципу прийняті і реалізуються ряд цільових програм, серед яких: Державна цільова програма реформування залізничного транспорту України на 2010-2015 роки, затверджена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2009 року №1390, Стратегія розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року, яку схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2009 року №1555-р., в яких ставиться пріоритетне завдання з оновлення вітчизняного рухомого складу. При цьому одним з основних напрямків державної політики щодо оновлення рухомого складу є перехід до довгострокового (п'ятирічного) планування роботи з даного виду діяльності, затвердженого Розпорядженням КМУ від 27.08.2008р. №1155-р. Згідно з цим розпорядженням нові вагони замовлятимуть у українських виробників, що сприятиме завантаженню машинобудівного комплексу України та надасть йому можливість використати свій потенціал: це нові робочі місця, додаткові нарахування до бюджету, збут на ринку металургійної продукції. За оцінками фахівців, на сьогоднішній день, особливо гостро відчувається дефіцит напіввагонів, що обґрунтовує необхідність оновлення їх парку. При цьому Державною програмою «Український вагон» (затверджена Міністерством інфраструктури України 04 лютого 2011р.) обумовлено необхідність розробки та впровадження нових вітчизняних моделей напіввагонів з сучасним рівнем техніко-економічних показників. Тому при проектуванні нових та модернізації вже існуючих моделей напіввагонів необхідно керуватись сучасними вимогами до їх конструкцій. Проте аналіз фахової довідкової та спеціально-технічної

літератури засвідчив про відсутність проведення та висвітлення результатів робіт з визначення та об'єднання інформації щодо сучасних вимог до конструкцій напіввагонів.

Мета статті та викладення основного матеріалу

В статті представлено сучасні вимоги до нових моделей залізничних напіввагонів та тих, що модернізуються.

У загальному випадку *до конструкцій напіввагонів висуваються наступні вимоги:*

- напіввагони повинні бути придатні для експлуатації на залізницях колії 1520 мм України, країн СНД, Латвійської Республіки, Литовської Республіки і Естонської Республіки, Грузії і мати можливість виходу на колію 1435 мм;
- конструкція повинна бути патентно-чистою;
- вагон повинен бути виготовлений в кліматичному виконанні «УХЛ» категорія розміщення І по ГОСТ 15150, із забезпеченням експлуатаційної надійності в діапазоні температур повітря від мінус 60 °С до плюс 50 °С;
- 85%-вий термін служби вагонів до списання – 22 роки; 90%-вий термін служби до першого капітального ремонту – 12 років, або 850 тис.км, 95%-вий термін служби до першого деповського ремонту – 3 роки, або 210 тис.км. Встановлене безвідмовне напрацювання на елементи, що впливають на безпеку руху – не менше 3 років;
- конструкція напіввагонів повинна відповідати вимогам до використання прогресивних технологічних процесів, вживання уніфікованого типового устаткування і технологічного оснащення. Має бути зручною при технічному обслуговуванні, ремонті і експлуатації;
- конструкція напіввагонів повинна відповідати вимогам [1...6] та РД 32.68 «Расчет неровностей железнодорожного пути для использования, исследования и проектирования пассажирских и грузовых вагонов»;
- матеріал литих деталей напіввагонів повинен відповідати вимогам ГОСТ 977-88, ТУ 24.05.486-82, ОСТ 32.183-2001, ОСТ 24.153.08-78, при цьому вміст вуглецю в деталях, що підлягають зварюванню, не повинен перевищувати 0,23 %. Технічні вимоги до допусків на розміри і масу відливок, припускам на механічну обробку по ГОСТ 26645-85. Якість заклепувальних з'єднань повинна відповідати вимогам ОСТ 24.050.35-91.
- у конструкції напіввагонів мають бути максимально використані стандартні, уніфіковані і запозичені складальні одиниці і деталі: коефіцієнт використання матеріалів, не менше 0,86; - коефіцієнт уніфікації, не менше 0,25;
- зовнішня форма напіввагонів повинна відповідати вимогам до дизайну, що визначають композиційну цілісність, інформаційну і художню виразність, раціональність форми відповідно до вимог ДСТУ 3943-2000 і ДСТУ 3944-2000. Елементи напіввагонів повинні відповідати антропометричним і функціональним особливостям обслуговуючого персоналу з точки зору зручності технічного обслуговування, поточного ремонту, огляду ходових частин, підвагонного устаткування і гальмівної системи. Всі вузли і елементи гальмівного і автозчепного устаткування, які обслуговуються і перевіряються в

експлуатації, бути доступними для візуального огляду, регулювання і заміни, у тому числі, у разі потреби, і на пунктах технічного обслуговування вагонів.

Вимоги до модулів кузова та рами:

- для обшиви бокових і торцевих стін кузова, полотен кришок розвантажувальних люків, повинні застосовуватися сталі марок 09Г2С, 09Г2Д, 09Г2 по ГОСТ 19281, з границею міцності не нижче 295. Несучі елементи рами і кузова повинні виготовлятися зі сталі марок 09Г2С, 09Г2Д, 09Г2 14-ої категорії зварюваності, класу міцності 345 по ГОСТ 19281;

- несучі елементи кузова повинні забезпечувати розрахункову міцність при експлуатаційних навантаженнях, у тому числі і при навантаженнях, що виникають при проведенні навантажувально-розвантажувальних та ремонтних робіт.

Вимоги до автозчепного модуля:

- автозчепні пристрої повинні включати - автозчеплення СА-3 з розмірами по ГОСТ 3475-81. Поглинаючі апарати підвищеної енергоємності класу не нижче Т1 відповідно до [3];

- контур зачеплення повинен виконуватись згідно ГОСТ 21447-75 і забезпечувати можливість безпосередньої взаємодії з типовим автозчепленням СА-3;

- передні і задні упори повинні бути приклепані до хребтової балки. Планки, що підтримують поглинаючі апарати, повинні виготовлятися по СОУ МПП 45.060-328:2010 і ОСТ 24.052.02-83. Планки проти стирання повинні виготовлятися по ОСТ 24.151.01-72.

Вимоги до гальмового модуля:

- несучі елементи важільної передачі повинні виготовлятися із сталей 14-ої категорії зварюваності, не нижче 325 класу міцності по ГОСТ 19281-89;

- конструкція гальмівної системи напіввагонів повинна забезпечувати мінімальні значення розрахункових коефіцієнтів сил натиснення гальмівних колодок, що допускаються по ефективності гальмування, відповідно до вимог [3], відповідати «Техническим требованиям на тормозную систему с раздельным торможением тележек и новым тормозным оборудованием для вагоностроительных заводов», «Техническим требованиям к тормозному оборудованию грузовых вагонов постройки заводов РФ», «Инструкции по ремонту тормозного оборудования вагонов» ЦВ-ЦЛ-945, «Инструкции з ремонту гальмівного обладнання вагонів» ЦВ-ЦЛ-0013, «Инструкции по эксплуатации тормозов подвижного состава железных дорог» ЦТ-ЦВ-ЦЛ-ВНИИЖТ/277, «Инструкции з експлуатації гальм рухомого складу на залізницях України» ЦТ-ЦВ-ЦЛ-0015;

- гальмівна система вагону повинна бути обладнана композиційними гальмівними колодками по СОУ МПП 45.060-258:2008. Розрахунковий гальмівний коефіцієнт сил натиснення композиційних колодок при середньому режимі гальмування: 1) порожнього, не менше 0,22; 2) завантаженого, не менше 0,14.

- гальмівна система напіввагонів повинна бути обладнана двома гальмівними циліндрами, що діють на кожен візок окремо. Автоматичне гальмо

повинне бути обладнано типовими комплектуючими: повітряним резервуаром Р7-78 ГОСТ 1561-75 або СОУ МПП 45.060-302:2009, або ГОСТ Р 52400-2005, а також виготовленим відповідно до нормативної, конструкторської і технічної документації заводів-виробників затвердженої в установленому порядку; розподільником повітря 483А-01 або 483М-01 по ТУ 3184-021-05756760-00 або 483М-01 по ТУ В 35.2-32602434-026:2007; авторежимом 265А-4 по ТУ 3184-509-05744521-98; камерою 295М.001 або 295М.002 по ТУ 3184-001-05744538-99; двома регуляторами гальмівних передач РТП-300 по ТУ 24.05.928-89; двома гальмівними циліндрами 710 по ТУ 3184-515-05744521-2004; кінцевими кранами 4304 М по ТУ В 35.2-32602434-020-2005 або СОУ МПП 45.060-257:2008 або ТУ 24.05.05.054-97; роз'єднувальним краном 4300 по ТУ 3184-003-10785350-99 або 1-4 У1 (усл.№372) по ОСТ 24.290.16-86 або 372 ТУ В 45-057-001-2000; рукавами з'єднувальними Р17Б по ТУ В 60.1-02971676.004-2001 або по ГОСТ 2593-82; повітропроводом з трійником 573 по ТУ 3184-513-05744525-2002 і важільною передачею по кресленням заводу-виробника;

- магістральний повітропровід на ділянках між трійником і кінцевим краном повинен бути виконаний цілісним і кріпитися до рами не менше ніж в семи місцях по довжині, включаючи кріплення на відстані 280-300 мм з обох сторін від контргайок трійника. При цьому кріплення трійника і кінцевих кранів до рами не враховується. Труби, що підводять повітря, повинні виконуватись цілісними. Повітропровід повинен бути виконаний із сталевих безшовних холоднодеформованих труб по ГОСТ 8733-74 і ГОСТ 8734-75 зовнішнім діаметром 42 мм і товщиною стінки 4 мм – для труб магістральних і зовнішнім діаметром 27 мм і товщиною стінки 3,2 мм – для робочого трубопроводу;

- у шарнірних з'єднаннях важільної передачі автоматичного гальма повинні бути використані зносостійкі втулки по СОУ МПП 45.040-067:2004, ОСТ 24.151.07-90 і ТУ 32 ЦВ 225-85. Осі важільної передачі гальмівної системи повинні виготовлятися по ГОСТ 9650-80 і ОСТ 24.412.13-84;

- різьба на деталях трубопроводу повинна бути виконана методом накатки. Допускається з'єднання магістрального повітропроводу з гальмівними приладами, за допомогою безрезьбових з'єднань по ТУ 3184-006-10785350-2007.

- гальмо стоянкове повинне мати типовий для вантажних вагонів привід по СОУ МПП 45.060-301:2009 і ОСТ 24.290.01-78 з дією на гальмівну передачу важеля одного візка і повинне забезпечувати утримання напіввагонів з повним розрахунковим завантаженням на ухилі не менше 30 ‰ при зусиллі на штурвалі не більше 300 Н. Гальмо стоянкове повинне забезпечувати повне зчеплення зубців черв'ячної передачі в робочому положенні і повне розчіплення в неробочому положенні. На обидві бокові сторони вагону повинні бути виведені повідці випускного клапана розподільника повітря.

Вимоги до ходової частини:

- ходова частина повинна складатися з двох двовісних візків, які по своїм параметрам, розмірам і технічним вимогам повинні відповідати: візкам типу 2 по ГОСТ 9246:2004;

- перед підкочуванням візків під вагони підп'ятникові місця повинні бути змащені солідолом жировим по ГОСТ 1033-79 або солідолом «С» по ГОСТ 4366-76;

- візки повинні бути обладнані пристроєм по рівномірному відведенню колодок від коліс при відпущеному гальмі;

- візки повинні бути обладнані зносостійкими елементами та жорсткими ковзунами.

Вищепредставлені вимоги є базовими для проектування нових моделей напіввагонів та тих, що модернізуються.

Висновки і рекомендації щодо подальшого використання

Визначенні та представлені у статті сучасні вимоги до нових моделей напіввагонів та тих, що модернізуються є основою для проведення науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт у відповідних напрямках і можуть бути використані для складання технічних завдань.

Вимоги до конструкцій інших типів проектуємих вантажних вагонів в основних своїх положеннях суттєво не відрізняються від представлених.

Список літератури: 1. ГОСТ 22235-76 Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ [Текст]/ Москва. 1976г. 2. ГОСТ 26725-97 Полувагоны четырехосные универсальные магистральных железных дорог колеи 1520мм. Общие технические условия[Текст]/ Госстандарт Украины, Киев, 1999г. 3. Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [Текст]. М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996г. – 354с. 4. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [Текст]- М.: ВНИИВ-ВНИИЖТ, 1983г. - 260 с. 5. НБ ЖТ ЦВ 01-98 «Вагоны грузовые железнодорожные. Нормы безопасности» МПС Россия. [Текст]- М.: ВНИИВ-ВНИИЖТ, 1998г. 6. ОСТ 24.050.34-84 Проектирование и изготовление стальных сварных конструкций вагонов. Технические требования [Текст]/ Министерство тяжелого и транспортного машиностроения. Москва. 1984г.

Поступила в редколлегию 11.06.2012

УДК 621.746.6:669.046.516.4:669.715

Ю.В. ДОЦЕНКО, канд. техн. наук, доц., НМетАУ, Днепропетровск,

В.Ю. СЕЛИВЕРСТОВ, докт. техн. наук, доц., НМетАУ, Днепропетровск

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО НА РАСПЛАВ СИСТЕМЫ Al-Si ПРИ ЗАТВЕРДЕВАНИИ

Розглянуто застосування технології газодинамічної дії на розплав в ливарній формі, яка дозволяє добитися стійкого ефекту подрібнення кристалічної структури, зниження шпаристості.

Ключові слова: технологія, газодинамічна дія, шпаристість, модифікування.

Рассмотрено применение технологии газодинамического воздействия на расплав в литейной форме, которая позволяет добиться устойчивого эффекта измельчения кристаллической структуры, снижения пористости.

Ключевые слова: технология, газодинамическое воздействие, пористость, модифицирование.

Application of technology of the gas-dynamic affecting is considered fusion in a casting form, that allows to obtain the steady effect of growing of crystalline structure, decline of porosity shallow.

Keywords: technology, gas-dynamic influence, porosity, modification.

Введение

Наиболее высокие и стабильные по сечению отливок свойства обычно достигаются при получении однородной и мелкозернистой структуры. Чем мельче размеры первичных кристаллов, тем выше ряд важных эксплуатационных и технологических свойств отливок. Поэтому литейщики чаще всего стремятся к получению наиболее мелкозернистой и однородной структуры металла.

Одним из наиболее распространенных средств достижения этой цели является модифицирование. Кроме того, к методам активного воздействия на формирование структуры слитков и отливок можно отнести процессы, связанные с применением давления, введения в расплав упругих колебаний, воздействия концентрированными источниками энергии [1-5]. При этом, указанные процессы обладают, в том числе, определенной технологической спецификой, имеют свои достоинства и недостатки.

Анализ предыдущих публикаций

Сплавы системы алюминий - кремний (силумины) служат основой большинства литейных алюминиевых композиций, широко применяемых как конструкционные материалы для фасонного литья в авиастроении, строительстве, транспорте и других отраслях промышленности. В связи со структурными особенностями литых сплавов - грубыми хрупкими включениями кремния и интерметаллических фаз - прочностные характеристики силуминов невысокие, особенно низка пластичность. Для улучшения структуры и механических свойств литейных промышленных сплавов алюминия регулируют режимы плавки и литья, условия кристаллизации отливок (литье в песчаные и металлические формы, под давлением и т.д.). Но наиболее действенным фактором, определяющим благоприятное структурообразование силуминов, остается модифицирование, т.е. измельчение структуры за счет введения в расплав перед его заливкой малых добавок модифицирующих элементов.

Для производства отливок из силуминов наибольший интерес представляют модификаторы, влияющие на размеры первичного зерна и форму включения эвтектического кремния. Для модифицирования зерен α Al-твердого раствора (основы сплава), прежде всего, следует использовать элементы переходных групп. Чем больше они имеют недостроенных оболочек d и f, тем сильнее эффект модифицирования. При взаимодействии с алюминием элементы-модификаторы образуют тугоплавкие интерметаллиды (TiAl_3 ; ZrAl_3 ; TiB_2 и др.), обладающие однотипными кристаллическими решетками и размерным соответствием их параметров в некоторых кристаллографических плоскостях с решетками α Al - твердых растворов. В расплавах появляется много центров кристаллизации, что обуславливает измельчение зерна в отливках. Значительное уменьшение размеров зерна в сплавах алюминия получают совместным вводом титана и бора в виде тройной лигатуры Al-Ti-B ($\text{Ti/B} = 5/1$). Центры кристаллизации- частицы соединения TiB_2 по 2-6 мкм. Для ввода титана и бора используют лигатуру Al-Ti-B (1%B; 5%Ti), препарат зернолит (%: $55\text{K}_2\text{TiF}_6 + 3\text{K}_2\text{SiF}_6 + 15 \text{C}_2\text{Cl}_6$) или флюс,

содержащий фторборат и фтортитанат калия (%: 35NaCl; 35KCl; 20K₂TiF₆; 10KBF₄). Наибольшая степень усвоения титана и бора - при использовании флюса, который наряду с модифицирующим оказывает и рафинирующее воздействие. Хорошие результаты дает совместное модифицирование цирконием, титаном и бором [6-10].

Ниобий также может быть использован как модификатор в виде лигатуры Al-10%Nb или соли K₂NbF₇. Зародыши кристаллов NbAl₃, стабильны в алюминиевом расплаве. Модифицирование лигатурой Al-10%Nb эффективнее, а время выдержки расплава в печи после модифицирования увеличивается (по сравнению с солью K₂NbF₇).

Классический модификатор эвтектики в силуминах - натрий. Если его модифицирующее действие признается всеми, то влияние других элементов вызывает разногласия. По разным данным [11, 12] эффективными модификаторами эвтектики Al-Si являются, %: 0,1 Na; 2,0 K; 3,5 Bi; 1,5 Pb; 7,0 Cd; 1,5 Sb; 1,0 Ca; 1,0 Li; 3,0 Mg; 0,7 Cr; 1,0 Mn; < 0,3 Ni; 0,728 P; 0,08-0,14 As; 0,765 Sc; 0,07 Zn; 0,07 S; 0,082 Bi; 0,082 In. Применение натрия для модифицирования ограничено рядом существенных недостатков: опасность получения не полностью модифицированной или перемодифицированной структуры, повышением газосодержания, уменьшением жидкотекучести, развитием усадочной пористости (щелочные и щелочноземельные металлы уменьшают плотность алюминиевого расплава, увеличивают температурный коэффициент объемного расширения и, как следствие, его объемную усадку при кристаллизации); потерей модифицирующего эффекта после рафинирования, фильтрации, вакуумирования, быстрым выгоранием, что требует возобновления модифицирования через каждые 30 мин. Последнее обстоятельство особенно неблагоприятно для серийного и массового производства литья при разливке из раздаточных печей, в которых обработанный натрийсодержащими флюсами расплав обеспечивает полностью модифицированную структуру лишь в начальный период разливки. В связи с этим, была исследована возможность замены натрия и его соединений другими модификаторами [13, 14]. Были исследованы возможности применения стронция как модификатора алюминиево-кремниевых сплавов в промышленности. Его преимущества перед натрием связаны, прежде всего, с более длительным сохранением модифицирующего эффекта, в том числе, после переплавов. Оптимальная концентрация стронция ~ 0,04%, температура модифицирования 750-770°C [5]. Однако, как показали исследования, имеется ряд существенных ограничений его широкому применению. Введение стронция в металлическом виде затруднено из-за самовозгорания, токсичности паров, необходимости повышения температуры расплава, что увеличивает его газопоглощение. Кроме того, высокая стоимость чистого стронция также ограничивает применение этого материала.

Другой признанный модификатор длительного действия - сурьма (~0,2%) [5]. Модифицирующий эффект при ее вводе сохраняется до 4 ч, но полностью снимается в присутствии натрия. Увеличивать содержание сурьмы в Mg-содержащих силуминах > 0,22 % нецелесообразно, так как в них образуется хрупкая фаза Mg₃Sb₂. При модифицировании силуминов сурьмой повышается плотность отливок, что существенно улучшает их пластичность и прочностные свойства, особенно при повышенных температурах. Эти добавки не приводят к газовой

пористости даже при литье с малыми скоростями затвердевания (массивные отливки в песчаные формы). Структура, а следовательно, и свойства отливок менее чувствительны к условиям охлаждения, что весьма важно для деталей сложной конфигурации.

При модифицировании сурьмой и висмутом не образуются тонкоразветвленные дендриты кремния коралловидной формы, в чем принципиальное отличие их модифицирующего действия от натрия и стронция. Но, в то же время, добавки сурьмы могут вызвать укрупнение зерна твердого раствора алюминия при литье, что приводит к снижению пластичности и прочности сплавов, кроме того, концентрация сурьмы, обеспечивающая хороший модифицирующий эффект, не соответствует концентрации, обеспечивающей максимальную плотность сплава.

Целью работы является анализ технологии комбинированного воздействия на расплав системы Al-Si для получения требуемых физико-механических характеристик металла отливок.

Основной материал

По современным представлениям строение металлического расплава не является гомогенным. В некотором интервале температур полного смешивания атомов не происходит, а возникают микрообласти со структурой ближнего порядка, характерной для кристаллической фазы. Эти образования называют по-разному: атомными группировками, скоплениями, сгустками, островками, комплексами атомов, кластерами и т.д. Их плотность и размеры зависят от состояния расплава. С увеличением степени перегрева они диссоциируют, приближаясь к однородной смеси разнородных атомов. Но в предкристаллизационный период и в процессе кристаллизации существующие в расплаве атомные группировки служат инициаторами зарождения одноименных кристаллов. В эвтектическом расплаве Al-Si такими подготовительными к кристаллизации атомными скоплениями предполагаются «кристаллизуемые» кластеры кремния со структурой, близкой к структуре кристалла или гетерофазные комплексы атомов кремния (ГФКА Si), на базе которых и происходит образование кристаллов кремния.

В последнее десятилетие все большее применение в качестве модификаторов литейных сплавов получают ультрадисперсные порошки химических соединений (нанопорошки), которые выполняют роль дополнительных центров кристаллизации при первичной кристаллизации.

Химический состав синтезированных ультрадисперсных материалов, а также размерные, кристаллографические и физические показатели ультрадисперсных соединений представлены в таблице 1 и 2.

В работе [15] исследовали возможность применения комплексного модификатора системы Al-Sr-Ti-B в виде нанопорошков, полученных из лигатуры этой системы методом электроэрозионного диспергирования в углеродсодержащих средах (керосин, трансформаторное масло). Механические свойства сплава, модифицированного комплексным модификатором Al-Sr-Ti-B, на основе нанопорошка оказались выше, чем у сплава, модифицированного обычным модификатором Al-Sr-Ti-B. Значения предела прочности и относительного удлинения сплава, обработанного модификатором на основе

нанопорошка составило для образцов отлитых в кокиль 380÷400 МПа и 3÷6%, а для вырезанных из отливок 280÷320 МПа и 3÷7%. Показатели прочности и пластичности сохранялись при длительном выстаивании расплава (до 2 ч).

Эффективный способ изменения морфологии кристаллизующихся фаз - их затвердевание в резко неравновесных условиях [2-4, 6-13]. При этом создаются условия для измельчения зерна, значительного расширения растворимости в твердом состоянии, подавления роста грубых включений первичных интерметаллидов. В частности, в технологических схемах литья с кристаллизацией сплавов под давлением (ЛКД) давление, прикладываемое к расплаву в процессе затвердевания, значительно влияет на характер кристаллизации.

Таблица 1- Химический состав синтезированных ультрадисперсных материалов

Наименование соединений	Тип модификатора	Содержание элементов, % мас.									
		Si	Si _{своб}	C	C _{своб}	N	Al	Al _{своб}	Ti	Ti _{своб}	Mg
Карбид кремния (SiC)	Графитизирующий	60..65	1,0..2,0	30...32	2,5...3,0	0,5...1,0	-	-	-	-	-
Нитрид алюминия (AlN)	Графитизирующий	-	-	-	0,1...0,5	30...33	60...65	0,5...2,0	-	-	-
Карбид титана (TiC)	Инокулирующий	-	-	18...21	1,0...1,5	-	-	-	76...80	1,0...1,5	-
Нитрид титана (TiN)	Инокулирующий	-	-	-	1,0...2,0	20...23	-	-	75...78	1,0...1,5	-
Карбонитрид титана (TiCN)	Инокулирующий	-	-	15...17	0,5...1,0	19...22	-	-	60...65	0,5...1,0	-
Силицид магния Mg ₂ Si	Сфероидизирующий	33...36	1,0...2,0	-	-	1,0...2,0	-	-	-	-	63...65
Нитрид магния Mg ₃ N ₂	Сфероидизирующий	-	-	-	-	25...28	-	-	-	-	70...75

**Таблица 2- Размерные, кристаллографические и физические показатели
ультрадисперсных соединений**

Наименование ультрадисперсного материала	Пространственно-геометрическая форма частиц	Сингония	Тип фазы	Период решетки, нм		Плотность, кг/м ³	Температура плавления (разложения), °С	Размерность, нм		Удельная поверхность, м ² /г
				a	c			Диапазон разброса	Усредненная	
Карбид кремния (SiC)	гексагональная, тригональная	гексагональная	внедрения	0,308	1,004	3220	2830 разложения	50...350	19,0	82,5
Нитрид алюминия (AlN)	гексагональная	гексагональная	внедрения	0,287	0,932	2350	2200 плавления	50...350	18,5	73,0
Карбид титана (TiC)	кубическая	кубическая	внедрения	0,432	-	4920	3140 плавления	20...55	35,0	25,0
Нитрид титана (TiN)	кубическая	кубическая	внедрения	0,424	-	5430	2950 плавления	25...60	40,5	29,5
Карбонитрид титана (TiCN)	кубическая	кубическая	внедрения	0,426	-	4950	3120 плавления	20...55	36,5	24,5
Силицид магния (Mg ₂ Si)	кубическая, сферическая	кубическая	замещения	0,634	-	2920	1170 разложения	20...75	45	70,5
Нитрид магния (Mg ₃ N ₂)	сферическая, кубическая	кубическая	замещения	0,653	-	2710	1500 разложения	35...125	78	48,0

Увеличение скорости охлаждения приводит к соответствующему росту скорости кристаллизации, которая изменяется в результате влияния давления при кристаллизации на число центров и скорость роста зародышей. Скорости охлаждения возрастают в зависимости от габаритов отливок, температурных условий литья, метода прессования от 2-3 до 10 и более раз [1]. Повышение скорости охлаждения цветных сплавов, основанных на системах с ограниченной растворимостью, приводит к изменению структуры и легирования твердого раствора, связанных с дендритной ликвацией и образованием квазиэвтектики. В настоящее время во многих работах достаточно подробно рассмотрены вопросы получения качественных отливок при кристаллизации под давлением, создаваемым поршнем, пуансоном, либо всесторонним газовым давлением [1, 7, 10]. При всех указанных способах эффективность воздействия в течение времени затвердевания отливки обратно пропорциональна толщине затвердевшего слоя металла, т.к. внешнее давление в том или ином виде прикладывается к ее поверхности. С технологической точки зрения этот процесс влечет ряд известных недостатков, касающихся, в том числе, необходимости наличия специального

оборудования, ограничений по массе, виду сплава, конфигурации литых заготовок и пр.

Одним из эффективных способов воздействия на кристаллизующийся металл является, в частности, газодинамическое воздействие [16, 17]. При осуществлении такого процесса к моменту начала подачи газа на поверхности рабочей полости литейной формы должен сформироваться слой твердого сплава такой толщины, который может обеспечить герметичность системы вплоть до полного затвердевания отливки.

Также к числу методов воздействий на кристаллизующийся металл, нашедших практическое применение, относятся методы, использующие введение в расплав упругих колебаний.

Все виды вибрационной обработки затвердевающих расплавов характеризуются следующими особенностями: наличием макроконцентраций объемов металла и его перемешиванием, возникновением упругих колебаний в расплаве и перемещением микрообъемов расплава, возникновением и развитием кавитации. Механизм измельчения первичного зерна при вибрационной обработке можно свести к следующим основным процессам [6, 7, 12]: гетерогенному и гомогенному зарождению центров кристаллизации, разрушению дендритов, активации тугоплавких примесей, становящихся центрами кристаллизации.

Наличие макроконцентраций объемов металла способствует распределению центров кристаллизации. Основным механизмом измельчения зерен здесь является разрушение дендритов под действием изгибающих напряжений. При низких частотах главной составляющей является сила сопротивления дендрита потоку вязкой жидкости, колеблющейся возле него. При повышении частоты колебаний (ультразвуковые колебания) к этой силе добавляется инерционная сила, обусловленная разностью плотностей твердого дендрита и окружающей его жидкости. При еще больших частотах возникает так называемый акустический ветер - направленное движение жидкости, обусловленное возникновением разности давлений в направлении излучения.

Низкочастотная вибрация, применяемая на практике, характеризуется частотой до 200 Гц и амплитудами, в основном не превышающими 2-3 мм. Наличие в кристаллизующемся металле волн сжатия и растяжения может приводить к развитию кавитации. Этим объясняется отмечаемая рядом исследователей интенсивная дегазация металла и значительное улучшение макроструктуры слитков кипящей стали - увеличение толщины плотной корки и изменение зоны расположения вторичных пузырей.

Эффективность перемешивания макрообъемов незначительна. Поэтому невелика и возможность влияния макропотоков на разрушение кристаллов на фронте кристаллизации. На эффективность применения вибрационной обработки сплавов влияют место и направление вибрационного импульса, размеры, удельный вес и межфазные свойства неметаллических включений, плавающих кристаллов, твердых частиц тугоплавких оксидов, карбидов, интерметаллидов и других монодисперсных частиц. Например, под воздействием одной и той же волны плавающие кристаллы и центры кристаллизации, имеющие больший

удельный вес, чем среда, всегда будут двигаться к границе затвердевания, а неметаллические включения - в противоположном направлении. Практикой подтверждается только влияние низкочастотной вибрации на измельчение микроструктуры слитков и отливок. Положительного влияния на снижение зональной ликвации и химической неоднородности при применявшихся режимах обработки не наблюдается [1, 7].

К главным особенностям обработки расплавов ультразвуковыми колебаниями можно отнести: возникновение и развитие кавитации и акустических потоков в объеме обрабатываемого расплава; сравнительно невысокую энергию ультразвука, трансформируемую в мощные ударные волны вблизи захлопывающихся пузырьков, которые, воздействуя на жидкую фазу и двухфазную зону, вызывают диспергирование кристаллов, зарождение центров кристаллизации и активацию твердых частиц; создание направленного акустического потока [2, 4, 11]. К недостаткам ультразвукового воздействия на расплав можно отнести: малую амплитуду колебаний, которая меньше величины контактных зазоров между отливкой и формой, что вызывает необходимость введения ультразвуковых колебаний непосредственно в расплав; рассеивание ультразвуковых волн в небольшом объеме вблизи волновода, что не позволяет обрабатывать значительные объемы металла; тяжелые условия работы погруженных в расплав волноводов, обуславливающие их низкую стойкость, а также их эрозию, вызывающую опасность загрязнения расплава.

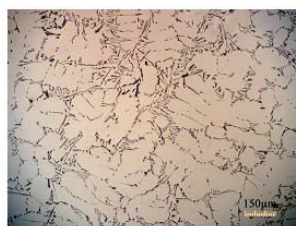
В силу указанных причин ультразвуковая обработка нашла применение при сравнительно небольших размерах формы, при непрерывной разливке алюминия и других легкоплавких сплавов, а также при получении ряда сплавов с особыми свойствами в процессах вакуумно-дуговой плавки, электрошлакового переплава, зонной плавки [4]. Ультразвуковую энергию при использовании в этих технологиях проводят через твердое основание слитка.

Отличительной особенностью метода воздействия на расплав источниками концентрированной энергии является большая мощность выделяемой энергии в сравнительно короткий промежуток времени. Это приводит к возникновению ударной волны. Электрогидроимпульсная обработка приводит к ускорению процесса кристаллизации металла, зона транскристаллизации уменьшается в 2-4 раза. Размеры разориентированных дендритов уменьшаются в 2-5 раз. Однако, амплитуда колебаний выходных звеньев обычно незначительна, эффект обработки зависит от качества контакта рабочего органа с обрабатываемой поверхностью. Использование системы боковых разрядных устройств в системе стенка изложницы - затвердевший слой - расплав связано с высокими потерями механической энергии и сужением спектра генерируемых частот [2].

В лаборатории современных материалов Ариэльского университетского центра были проведены исследования влияния переменного газового давления на структурообразование металла отливок из сплава А356. Результаты лабораторных исследований показали повышение механических свойств литого металла и снижение пористости цилиндрических отливок из сплава А356 диаметром 50 мм и высотой 100 мм. В порядок технологических операций изготовления отливки были включены следующие этапы: проведение

рафинирования (препарат DEGASAL T 200, введение в рабочую полость формы устройства для подачи газа оригинальной конструкции, выдержка отливки с устройством в течение заданного промежутка времени, подача газа (аргона) с начальными показателями давления 0,15 – 0,2 МПа, последующее наращивание давления до 1,3 – 1,4 МПа и выдержка под давлением до полного затвердевания отливки. На рисунке представлена микроструктура сплава А356 до и после обработки. Приведенные данные свидетельствуют о том, что в результате газодинамического воздействия удалось измельчить структурные составляющие, в результате чего увеличились на 20-25% пластические свойства литого металла и на 8-12 % увеличилась его плотность. Таким образом, газодинамическое воздействие на затвердевающий металл позволяет добиться эффекта модифицирования, который может быть значительно усилен введением в расплав

дополнительных центров кристаллизации в виде соответствующих традиционных модификаторов либо нанокристаллических порошков, полученных методами механохимии. При этом возможно снижение количества расходуемого модификатора.



а



б

Рис. Микроструктура сплава А356 до (а) и после обработки (б)

Выводы

1. Приведенные данные свидетельствуют о перспективности комплексного применения различных активных методов воздействия на затвердевающий металл, позволяющих в определенной степени компенсировать недостатки отдельно взятого метода.

2. Применение технологии газодинамического воздействия на расплав в литейной форме позволяет добиться устойчивого эффекта измельчения кристаллической структуры, снижения пористости, более благоприятного распределения неметаллических включений и повышения механических свойств литого металла.

3. Несомненный интерес представляет проведение исследований, направленных на определение оптимальных режимов совместного применения процессов модифицирования и затвердевания сплава в неравновесных условиях, обеспечиваемых тем или иным способом внешнего физического воздействия. При комплексном подходе возможно эффективнее измельчить структурные составляющие и значительно повысить физико-механические свойства литого металла.

4. Использование комбинированного воздействия на структурообразование для получения требуемых физико-механических характеристик металла отливок позволит снизить количество применяемого модифицирующего препарата и времени обработки.

Список литературы: 1. Затвердевание металлического расплава при внешних воздействиях [Текст]/ А.Н. Смирнов, В.Л. Пилюшенко, С.В. Момот, В.Н. Амитан. - Д.: Издательство «ВИК» - 2002. - 169 с. 2. Ефимов, В.А. Перспективы развития работ по применению внешних

воздействий на жидкий и кристаллизующийся расплав [Текст] / В.А. Ефимов. - Киев: Изд. ИПЛ АН УССР. - 1983. - С. 3-65. 3. Немененок, Б.М. Теория и практика комплексного модифицирования силуминов [Текст] / Б.М. Немененок - Мн. Технопринт, 1999. - 272 с. 4. Скворцов, А.А. Влияние внешних воздействий на процесс формирования слитков и заготовок [Текст] / А.А. Скворцов, А.Д. Акименко, В.А. Ульянов - М.: Металлургия, 1995. - 272 с. 5. Ефимов, В.А. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов [Текст] / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов. - М.: Металлургия, 1995. - 272 с. 6. Эльдарханов, А.С. Процессы кристаллизации в поле упругих волн [Текст] / А.С. Эльдарханов. - М.: Металлургия, 1996. - 256 с. 7. Скребцов, А.М. О некоторых возможностях измельчения зерна металла отливки при внешнем воздействии на затвердевающий расплав [Текст] / А.М. Скребцов, Л.Д. Дан, А.О. Секачев и др. // Металл и литье Украины. 1996. - № 1-2. - С.30-34. 8. Борисов, Г.П. Давление в управлении литейными процессами [Текст] / Г.П. Борисов. - К.: Наукова думка, 1988. - 271 с. 9. Абрамов, О.Б. Кристаллизация металлов в ультразвуковом поле [Текст] / О.Б. Абрамов. - М.: Металлургия, 1972. - 256 с. 10. Пилюшенко, В.Л. Влияние виброимпульсного воздействия на условия затвердевания стали [Текст] / В.Л. Пилюшенко, А.Н. Смирнов. - В кн.: Черная металлургия. Наука – технология – производство. М.: Металлургия, 1989. - С. 162-171. 11. Ульянов, В.А. Кинетика формирования стальных слитков при пассивных и активных внешних воздействиях [Текст] / В.А. Ульянов, Е.М. Китаев, А.А. Скворцов. // Процессы литья. - 1993, №4. - С.38-43. 12. Скребцов, А.М. Формирование структуры и конуса осаждения слитка или отливки при внешнем воздействии на поверхность расплава [Текст] / Л.А. Дан, В.Б. Килочкин // Металл и литье Украины. - 1994. - №7-8. - С.5-9. 13. Возможность использования комплексного модификатора длительного действия на основе нанопорошков длительного действия для повышения качества отливок из алюминиевых сплавов [Текст]: Новые материалы и технологии в машиностроении-2005. Сб. трудов IV Международной научно-технической конференции. / Брянск: БГИТА - 2005. - С. 17 –23. 14. Селиверстов, В.Ю. Технология газодинамического воздействия на расплав в литейной форме – один из перспективных способов повышения качества металла отливок [Текст] / В.Ю. Селиверстов. // Сучасні проблеми металургії. Наукові праці. Днепропетровск: Системные технологии. - 2007. - Том 10. - С. 25 – 35. 15. Селиверстов, В.Ю. Перспективы применения комбинированных способов управления структурообразованием литого металла [Текст] / В.Ю. Селиверстов, Ю.В. Доценко / Вісник ДДМА. - 2009. - № 1 (15). - С.267-273.

Поступила в редколлегию 11.06.2012

УДК 621.9.048.6

А.А. КЕЛЕМЕШ, ассис., Полтавская государственная аграрная академия

КЛАССИФИКАЦИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Приведено класифікацію та характеристику коливальних процесів, які застосовуються при обробці матеріалу відновлюваних деталей.

Ключові слова: вібраційні коливання, вібробудувач, релаксація, деформація.

Приведены классификация и характеристика колебательных процессов, применяемых при обработке материала восстанавливаемых деталей.

Ключевые слова: вибрационные колебания, вибровозбудитель, релаксация, деформация.

The classification and characterization of oscillatory processes used in the processing of the material recovered parts.

Keywords: vibratory oscillation vibration exciter, relaxation, deformation.

1. Введение

Вибрационные процессы основаны на использовании колебаний, воздействующих на обрабатываемый материал. Физическая природа процессов вибрационной технологии достаточно сложна и связана с такими явлениями, как удар, кавитация, упрочнение и др.

Вибрационные колебания обрабатывающего инструмента оказывают положительное влияние на прочностные характеристики обрабатываемого материала деталей машин и способствуют повышению надёжности и долговечности как при изготовлении деталей и сборочных единиц, так и при их восстановлении.

2. Постановка проблемы

В условиях высоких скоростей относительного перемещения и нагрузок контактирующих поверхностей возрастают требования к износостойкости, усталостной прочности деталей, что в большинстве случаев, обеспечивается приданием обрабатываемому материалу необходимых физико-механических свойств. Исследование характеристик колебательных процессов и их использование в технологических процессах обработки является актуальной проблемой в повышении ресурса машин.

3. Основное содержание

Механические колебания, происходящие под действием сил, называют свободными, поскольку совершаются при отсутствии внешнего периодического воздействия. При изучении колебательных (вибрационных) процессов встречается понятие квазиупругой силы, которые по своей природе не являются упругими. Однако, их величина пропорциональна смещению тела от положения равновесия. Выражение квазиупругой силы имеет вид [1]:

$$P = -ku, \quad (1)$$

где k – коэффициент квазиупругой силы; u – смещение; знак минус указывает на противоположное направление вектора силы и смещения.

Свободные колебания называются затухающими, если затухания обусловлены одновременным действием квазиупругой силы и силы трения.

$$F_{TP} = -ru. \quad (2)$$

В свою очередь величина u равна:

$$u = Ae^{\delta t} \sin(\omega t + \phi), \quad (3)$$

где δ – коэффициент затухания; $Ae^{\delta t}$ – мгновенное значение амплитуды; e – основание натурального логарифма;

$$\delta = r / 2m; \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}, \quad (4)$$

где r – коэффициент сопротивления; m – масса колеблющегося инструмента; $\omega_0^2 = k / m$.

В отличие от свободных колебаний вынужденные колебания происходят под действием внешней периодической (возмущающей) силы и могут возникать в самых разнообразных условиях. В процессе вынужденных колебаний может возникнуть явление резонанса, характеризующееся резким возрастанием амплитуды колебаний тела. Это происходит вследствие равенства частоты возмущающей силы и собственной частоты системы.

Интенсивность процессов в колебательной системе (интенсивность вибраций) характеризуется соотношением между измеренным значением параметра процесса и некоторым значением, которое соответствует нулевому уровню [2]. Интенсивность колебаний может быть выражена:

$$\lambda = A\omega / 9,81. \quad (5)$$

В процессе вибрационной обработки металла (сплавов) может иметь место виброползучесть – явление увеличения величины деформации при постоянном уровне напряжений. При наложении на этот постоянный уровень дополнительных знакопеременных напряжений наблюдается ускорение ползучести, получившее название виброползучести.

Релаксация напряжений при наложении вибраций протекает более интенсивно и называется виброрелаксацией. Виброползучесть и виброрелаксация происходят вследствие изменения свойств обрабатываемого материала под влиянием вибраций.

Несмотря на большое многообразие технологического применения механических колебаний, основу соответствующих процессов определяет характер взаимодействия вибрирующего элемента (обрабатывающего инструмента) с объектом взаимодействия (отдельными деталями).

Механические колебания применяются в следующих технологических направлениях:

1. Непосредственное воздействие колебаний на объект (деталь). При этом технологическая реализация может происходить в двух вариантах. В первом варианте образец, подлежащий восстановлению, находится в неподвижном состоянии, закреплённом в матрице. Обрабатывающий инструмент (пуансон) крепится к плите вибровозбудителя, совершая колебания, вместе с вибровозбудителем перемещается навстречу образцу (рис.1). При втором варианте вибровозбудитель с закреплённым пуансоном совершает колебания вокруг нейтрального положения. Матрица же с образцом (деталью) перемещается навстречу вибрирующему пуансону.

Эксперименты проводились на установках, выполненных по двум вариантам. Схема вибрационного узла установки, изготовленной по второму варианту, показана на рис. 2.

Вибровозбудитель (1) с пуансоном (5) крепится на плите (4), по краям которой закреплены четыре ролика (3). Ролики перемещаются по направляющим

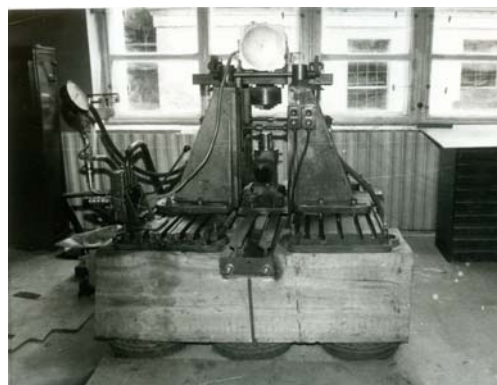


Рис. 1. Вибрационная установка для обработки деталей, выполненная по первому варианту

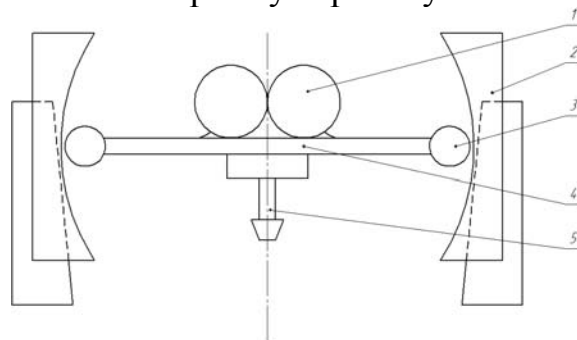


Рис. 2. Схема вибрационного узла установки, выполненной по второму варианту

пластинам (2) определённой кривизны.

2. Воздействие колебаний на технологическую среду с целью приведения её в активное состояние, обеспечивающее обработку.

Вибрационное воздействие на объекты (детали), подвергаемые обработке, сопровождается изменением их физического состояния и превращениями, особенности которых определяются параметрами колебаний.

Под воздействием вибраций в обрабатываемом материале распространяются волны деформаций. При воздействии деформаций на многослойные среды слой, прилегающий к вибрирующему рабочему органу (обрабатываемому инструменту), получает от него силовые импульсы, которые передаются следующим частицам и слоям. Вследствие инерционности, наличия сил трения и необратимых (остаточных) деформаций (например, пластическая деформация материала деталей) импульсы по мере передачи их от слоя к слою (по мере удаления от вибрирующего органа) постепенно ослабевают. Степень затухания определяется свойствами материала, а также характером и величиной силовых импульсов. Энергия колебательного движения источника вибраций в процессе прохождения волны затрачивается на ускорение обрабатываемой детали и на восполнение потерь при необратимых деформациях.

4. Выводы

Полученные данные позволяют сделать следующие выводы.

1. Приведена классификация механических колебаний и их влияние на технологический процесс обработки материала деталей.

2. Дается характеристика колебательных процессов и рассмотрен их механизм, обеспечивающий деформацию обрабатываемого материала.

Список литературы: 1. *Бабичев А.П.* Отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом / *А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко и др.* – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2003. – 191 с. 2. *Бабичев А.П.* Основы вибрационной технологии / *А.П. Бабичев.* – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ. 4.2, 1994. – 89 с.

Поступила в редколлегию 11.06.2012

УДК 621.3.078, 621.45.034, 621.45.018.2

С. КОСТЁЛОВ, асп., асис., Луцкий національний технічний університет,
І. КОНОВАЛЕНКО, канд. техн. наук, доц., Тернопільський національний
технічний університет ім. І.Пулія

ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ РЕМОНТУ І ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ КОЛЕКТОРА ОСНОВНОГО ПАЛИВНОГО ВУЗЛА ГТД

У роботі досліджено проблему випробування паливних колекторів основного паливного вузла газотурбінного двигуна на базі засобів та методів, які застосовуються на авіаремонтних підприємствах. Проаналізовано фактори впливу та математичні методи аналізу і показано, що одним із оптимальних варіантів рішення задачі автоматизації є впровадження математичного та імітаційного моделювання. Це дозволить вести електронний облік даних випробувань та вимірювань, в автоматичному режимі проводити розрахунки та передбачувати поведінку системи в заданих режимах. В процесі аналізу було визначено основний напрямок побудови

моделі та встановлено основні фактори, які впливають на процес. За результатами проведеної роботи складено методологію подальшого дослідження.

Ключові слова: автоматизація, двосоплова двоконтурна форсунка, паливний колектор, математична модель, факел розпилю.

В работе исследована проблема испытания топливных коллекторов основного топливного узла газотурбинного двигателя на базе средств и методов, которые применяются на авиаремонтных предприятиях. Проанализированы факторы влияния и математические методы анализа и показано, что одним из оптимальных вариантов решения задачи автоматизации является внедрение математического и имитационного моделирования. Это позволит вести электронный учет данных испытаний и измерений, в автоматическом режиме производить расчеты и предвидеть поведение системы в заданных режимах. В процессе анализа было определено основное направление построения модели и установлены основные факторы, влияющие на процесс. По результатам проведенной работы составлено методологию дальнейшего исследования.

Ключевые слова: автоматизация, двухсопловая двухконтурная форсунка, топливный коллектор, математическая модель, факел распыла.

The problem on research and test of research and testing of the basic fuel manifold GTE on the basis means and methods which are applied at the aircraft repair enterprises is considered. Analyzed the impacts and mathematical methods of analysis and show that one of the best options for solving the problem of automation is to introduce mathematical and simulation modeling. This will keep electronic records of test data and measurements automatically perform calculations and predictability of behavior in the desired mode. During the analysis it was determined the main direction of constructing a model and set the main factors affecting the process. At this stage of the study, the results of the work methodology prepared for further study.

Keywords: automation, dual circuit nozzle atomizers, fuel manifold, a mathematical model, torch atomization.

Авіаційний газотурбінний двигун (ГТД) – найскладніший у проектуванні, виготовленні, збірці і обслуговуванні елемент літального апарату. На сьогоднішній день стає неможливим проектування і виготовлення конкурентоспроможної наукомісткої продукції без застосування сучасних технологій та методів, у тому числі і математичного моделювання. Теж саме можна сказати про ремонт та випробування агрегатів, що вимагає великих витрат енергоресурсів та часу.

Математичні моделі застосовують як на стадії розробки, проектування та доведення, так і на пізніших стадіях життєвого циклу – на стадії експлуатації, у тому числі післяремонтних випробуваннях. Моделювання окремих вузлів і авіаційних газотурбінних двигунів у цілому дає багато корисної інформації без витрат на виробництво окремих елементів, випробувальні стенди і самі випробування. На жаль, ціною відмови від додаткових витрат стає точність моделювання та передбачення поведінки об'єкта дослідження по поведінці математичної моделі.

У даній роботі проводиться опис та аналіз можливостей застосування математичного моделювання для автоматизації ремонтних робіт і випробувань паливного колектора основного паливного вузла ГТД.

I. Опис проблеми

На більшості сучасних ГТД в основних камерах згоряння використовують багатофорсункові схеми подачі палива із застосуванням двухконтурних

двосоплових відцентрових форсунок. Це дозволяє значною мірою розширити діапазон роботи камери згоряння при запуску ГТД, на дросельних режимах і у висотних умовах за рахунок підвищення тиску впорскування на малих витратах.

Перед розглядом проблематики ремонту колектора основного паливного вузла проаналізуємо механізм багатофорсункової системи подачі палива та режими її роботи.

При роботі на режимах з малими витратами палива клапан закритий і паливо в двигун впорскується через (додатковий) контур І колектора, канал якого з'єднаний із центральним каналом форсунки (рис. 1). Зі збільшенням режиму роботи двигуна тиск перед клапаном зростає і при певній величині відкривається ІІ контур колектора (основний) внаслідок подолання затягування пружини розподіленням навантаженням від тиску палива. Канали двох контурів мають різні прохідні перерізи. Прохідні перерізи першого контуру менші ніж другого; малі перерізи забезпечують високий тиск впорскування і хорошу якість розпилу палива на малих витратах. Прохідні перерізи другого контуру більші, вони дозволяють пропустити через форсунку велику кількість палива без надмірного підвищення тиску впорскування [9].

Спільна витратна характеристика двосоплової форсунки із розподільником потоку представлена на рис. 2. Ділянка АВ характеристики відповідає подачі палива через перший контур форсунки, ВС – режиму відкриття золотника клапану розподільника і CD – подачі палива через обидва канали форсунки. Дійсну витрату форсунки відображає крива ABCD. Протяжність ділянки ВС, який відповідає різним прохідним січенням другого контуру розподільника зі збільшенням у міру зростання тиску палива $p_{\text{ф}}$, визначається заданим законом зміни площі перерізу при переміщенні золотника. Сумарна витратна характеристика з усіма форсунками камери згоряння визначається кількістю головок жарових труб, в яких встановлюють форсунки. Індивідуальна витрата палива через кожен форсунку визначається положенням кожної камери і висотою гідростатичного стовпа рівня палива в основному (або додатковому) колекторі (при горизонтальному розташуванні камери згоряння).

У статтях із відкритим доступом описано проблеми, що виникають при застосуванні на ГТД двоконтурних двухсоплових форсунок, проте детального дослідження впливу недоліків подібної конструктивної схеми на ефективність робочого процесу ГТД не наводиться. Зокрема, в монографії А. Лефевра [1] подано наступне: «у двосопловій форсунці забезпечується висока якість розпилювання палива при низьких витратах завдяки більшому перепаду тисків у вузьких тангенціальних каналах внутрішньої форсунки. В момент відкриття клапана основного контуру форсунки якість розпилювання палива погіршується внаслідок невисокого тиску подачі палива, а потім із зростанням витрат розпилювання поліпшується. Для підвищення якості розпилювання палива відразу після відкриття клапана зазвичай збільшують кут розкриття конуса розпилу додаткового контуру форсунки до значення, що трохи перевищує кут конусу основного контуру форсунки, для того щоб вони, зливаючись на малій відстані від форсунки, обмінювались енергією. При цьому розпилювання палива дещо погіршується.

Досліджено вплив сили тяжіння на розподіл палива в многофорсункових системах, які використовуються в більшості ГТД. Незадовільний розподіл палива відбувається при низькому тиску подачі, коли гідростатичний тиск стає істотним для нижніх форсунок. Збільшення тиску відкриття клапана трохи поліпшує розподіл палива по колектору». Під час ремонту двигунів паливний колектор демонтується з двигуна, розбирається, проходить відновлення з подальшою перевіркою та налагодженням, відповідно до технології ремонту.

Перевірку та налагодження паливного колектора виконують в декілька етапів, один з яких включає виведення витратних

характеристик нових, або відновлених форсунок паливного колектора, до технологічно заданого рівня. Після поступлення на ремонт, паливний колектор, після очистки та відновлення перевіряється на сумарні значення витрати по всіх контурах. Після цього форсунки, витратні характеристики яких не відповідають технічним умовам (ТУ), демонтують з колектора для відновлення або заміни. На етапі налагодження окремих паливних форсунок, виконується перевірка витрати по 12-ти секторах конуса розпилу та тангенціальний кут факела розпилу відповідно до технічного регламенту.

Нерівномірність розподілу палива по 12-ти секторах конуса розпилу обраховується за наступною формулою:

$$\delta\% = \frac{(Q_{\max} - Q_{\min})}{Q_{\max}} \cdot 100\%,$$

де $Q_{\max}$ – максимальне значення витрати на одному із секторів; $Q_{\min}$ – мінімальне значення витрати на одному із секторів.

Значення допустимої нерівномірності повинно бути: $\delta_{\text{дон}}\% \leq 50\%$. Замір нерівномірності проводиться при наявності палива у зливних трубках 12-ти секторної камери, через 2 хвилини роботи на заданому режимі.

Перевірка кута розпилу та зміщення осі факелу розпилу від осі форсунки, виконується наступним чином:

Кут розпилу має бути:

–80-90° – форсунки №9,17;

–75-90° – інші форсунки.

Відхилення осі конуса розпилу від осі форсунки:

–4° – для форсунок №9,17;

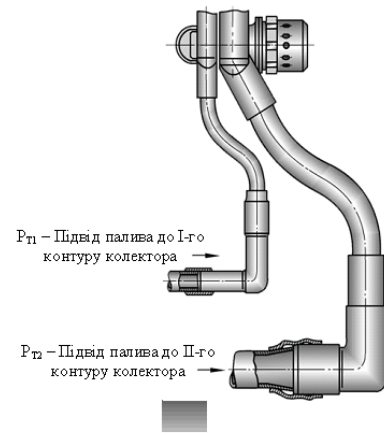


Рис. 1. Схема подачі палива до двухступеневої двосоплової форсунки з розподільником контурів

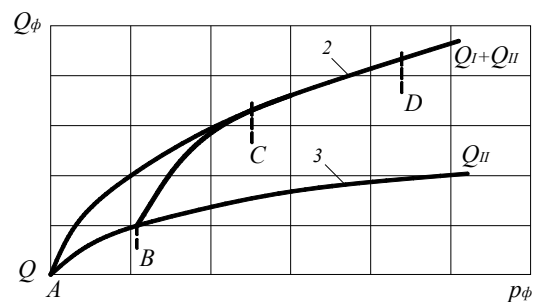


Рис. 2. Спільна витратна характеристика двосоплової форсунки із розподільником

–2° – для остальных форсунок.

Відхилення від осі факелу конуса розпилу від осі форсунки визначається як половина різниці між правим a та лівим b кутами.

Загальна витрата через форсунку визначається за наступною формулою:

$$Q_1 = \frac{Q_2 \cdot 3600}{T \cdot 1000},$$

Де Q_1 – витрата через форсунку кг/час; Q_2 – заміряна витрата через форсунку в грамах; T – час заміру витрати через форсунку в сек.

Далі виконують монтаж заміненних форсунок із подальшою перевіркою загальної (сумарної) витратної характеристики колектора. При цьому виникають похибки ремонту і випробувань, від яких значною мірою ускладнюється процес налагодження системи. Головна проблема заключається в тому, що від заводу-виробника поступають комплекти деталей, які не мають чіткої номенклатури. Така ситуація обумовлюється тим, що всі деталі виготовляються із значними допусками для можливостей доопрацювання, в залежності від умов зношення старих деталей [9]. Один комплект включає 10, деталей які мають допуск по верхній межі, і 10 деталей із допуском по нижній межі. Таким чином, при заміщенні бракованої деталі новою, чітке її налаштування практично неможливе і все залежить від досвіду майстра, який виконує роботу. І якщо форсунка виведена до нормованого значення ТУ, існує велика вірогідність того, що вона при встановленні на колектор дасть нові похибки, або виведе із ТУ інші форсунки [3]. В такому випадку форсунки знову знімають і доопрацьовують відповідно до технічного регламенту проведення ремонтних робіт. Можна сказати, що фактично якість ремонту і налагодження, а також час, який затрачається на весь процес, залежить від особистого досвіду майстра, який проводить всі операції. Крім того, випробування колектора в зборі проводиться у горизонтальному положенні, коли експлуатація його проходить у вертикальному розміщенні, що дає певний вплив, про який було описано вище.

Згадані проблеми та відсутність досліджень з даної тематики у відкритих джерелах вказують на актуальність проведення математичного аналізу впливу умов, методів ремонту та налагодження роботи паливного колектора із врахуванням двоконтурності паливного колектора на ефективність силової установки в особливих точках його підключення.

Таким чином, задля покращення та пришвидшення ремонтних робіт слід врахувати напрацьовану статистику відмов та результатів налаштувань, а також їх впливів на загальну систему. Побудова математичної моделі відповідно до законів максимальної вірогідності та розподілення випадкових величин дасть можливість передбачити параметри налаштування заміщеної форсунки. А застосування нечіткої логіки дозволить врахувати припущення та передбачення майстра з його особистого досвіду.

II. Аналіз основних параметрів та впливів

Поліпшення якості проведення ремонту та випробування колектора основного паливного вузла ГТД можливе із введенням автоматизації процесу за рахунок побудови математичних моделей та врахуванням похибок. Із впровадженням математичного моделювання у процес ремонту постає

можливість використання методів аналізу та синтезу, які застосовуються для розробки та проектування.

Отже, в першу чергу постає задача побудови моделі, яка б описувала робочий процес ГТД з врахуванням нерівномірного розподілу палива по паливному колектору. Необхідно побудувати модель таким чином, щоб було можливо врахувати зміни сумарного значення витрати залежно від результатів проведення їх індивідуальних випробувань за витратою по секторах. Також слід врахувати щільність розпилю і ввести уточнюючі коефіцієнти та врахувати статистичні дані напрацьовані за останні роки.

При побудові частини математичної моделі для розпилю палива через форсунки слід визначити, як правильно враховувати фази розпилювання, і як буде змінюватись дисперсність розпилюваних частинок. Щоб встановити, чи варто перевантажувати загальну модель даними значеннями, проаналізуємо гідродинаміку газорідинного факела розпиленої рідини.

Аналіз можливості побудови даної частини моделі був оснований на закономірності гідродинаміки дисперсних середовищ за допомогою двох математичних підходів – статистичного і феноменологічного.

Перший полягає в дослідженні фізичних явищ на основі молекулярної будови речовини. Перехід до макроскопічного опису властивостей і процесів проводять за допомогою функцій розподілу. Їх введення дозволяє представити властивості індивідуальних молекул (масу, кількість руху, енергію і т. д.) безперервно змінними по всьому простору, заповненому дискретним середовищем. Таким чином, цей підхід пов'язаний з введенням додаткових гіпотез про властивості мікрочастинок і їх взаємодії.

Другий заснований на уявленні про безперервність руху речовини і на отриманих дослідним шляхом певних закономірностях. Основою даного методу є гіпотеза суцільності (континуальності) кожної з фаз системи і середовища в цілому та використання для їх вивчення понять і методів механіки суцільного середовища. Сучасний феноменологічний підхід детально розроблений Х. А. Рахматуліним [4] і розвинений в роботах А. Н. Крайка, Р. І. Нігматуліна та інших авторів [2, 5]. Проаналізувавши дані роботи, можна зробити висновок, що факел розпорошеної рідини слід розглядати як відкриту для зовнішніх впливів систему рухомих і взаємодіючих крапель (утворених обома контурами форсунки) і суцільного середовища. Таким чином, в кожній точці простору рух як суцільної, так і дисперсної фаз залежить від внутрішніх (міжфазова взаємодія) і зовнішніх причин (взаємодія факела і зовнішнього середовища). Отриманню рівнянь, що описують процеси в багатофазних системах (дисперсне середовище іноді зручно розглядати як сукупність декількох фаз), присвячено багато робіт (наприклад, [2]). Однак для практики потрібні тільки деякі середні сумарні (інтегральні) величини, оскільки простежити за процесами, що відбуваються з кожною окремою краплею, практично неможливо.

Тому врахування фактора зміни дисперсності часток і як наслідок – зміни щільності розпилю в процесі змішування потоків може призвести до значного перевантаження моделі. Наслідком цього можуть бути значні розрахункові похибки при обробці даних моделі. Таким чином, варто включити у загальну

модель лише фактори зміни щільності розпилу, без врахування властивостей зміни дисперсності частинок.

Перш ніж перейти до аналізу моделювання процесів, що протікають при розпиленні, необхідно, по-перше, разом з силами, зумовленими статичним тиском, гравітацією і опором, оцінити вплив інших факторів; по-друге, вибрати рівняння для розрахунку коефіцієнта опору.

Спочатку проаналізуємо сили впливу. Оцінюючи сили, що описують ефект приєднаної маси, можна описати динамічний напір середовища відповідно до частки. Такий вплив проявляється лише на ділянці різкого гальмування крапель, тобто у корені факелу розпилу, де газ практично відсутній [6]. Таким чином, можна зробити висновок, що в нашому випадку цими силами при побудові математичної моделі можна знехтувати. Оцінюючи сили Бассе-Буссінеска, які враховують відхилення течії від усталеного значення і виражають миттєвий гідродинамічний опір, можна зробити висновок, що її можна брати до уваги лише в тому випадку, коли густина суцільної фази того ж порядку, що і густина дисперсних часток більша [7]. Тому для нашої задачі дані сили також можна не враховувати. Розглянувши вторинне подрібнення крапель у факелі розпилу та сили Бернуллі, що зумовлюються миттєвими різницями швидкостей, можна зробити висновок, що дані параметри також є несуттєвими, так як вони пов'язані із турбулентними пульсаціями. Пульсації потоку є фактично відсутніми, оскільки тиск подачі палива до колектора є постійним [6]. Отже, дослідивши основні сили впливу на потік, можна зробити висновок, що для нашої задачі немає необхідності складати рівняння для врахування коефіцієнтів опору.

Проаналізуємо вплив накладання факелів розпилу. При паралельній роботі кількох форсунок факели розпилу перетинаються. При цьому можлива зміна дисперсного складу крапель внаслідок їх зіткнень, зміна концентрації частинок і зменшення площі сукупного факела порівняно з сумою площ окремих факелів на тому ж рівні. Відмітимо деяку особливість цього фактора. Вже при порівняно невеликій відстані розпилювачів один від одного факели стають взаємно прозорими, і ймовірність зіткнення окремих частинок близька до нуля. При віддаленні від форсунки прозорість факелів швидко зростає, і ще задовго до їх перетину практично дорівнює одиниці. Тому при накладенні факелів коефіцієнт прозорості змінюється тільки в третій-четвертій значущій цифрі, і не може помітно вплинути на гідродинаміку.

Таким чином, паралельну роботу кількох форсунок слід враховувати в рівняннях зон вільного протікання:

рівняння балансу площ факелів f_ϕ та периферичного потоку f_n :

$$f = f_\phi + f_n, \quad (1)$$

та рівняння зміни січення факелу:

$$\frac{df_\phi}{dz} = 2\sqrt{\pi \cdot f_\phi} \cdot \frac{\omega_{\text{жф}}}{\omega_{\text{жз}}}. \quad (2)$$

Вважається, що до перетину кожен факел працює незалежно і обмежений площею f_ϕ . Після точки перетину на кожному кроці інтегрування з площі f_ϕ , розрахованої за рівнянням (2), віднімається площа відповідного сегмента або

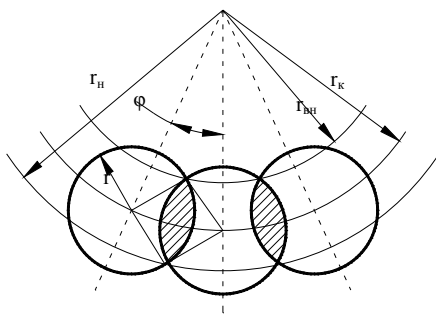


Рис. 3. Схема розміщення форсунок для утворення спільного факелу розпилу

Описаний прийом дещо умовний, проте дозволяє значно наблизитися до реальних умов процесу, так як площа основи конуса факелу розпилу буде змінюватись при досягненні периферійними факелами стінки жарової труби, але загальна витрата палива залишатиметься незмінною. Таким чином, оскільки ми маємо роботу із жорстко регламентованою технологією, безпосередньо по витратним характеристикам, описані вище параметри не мають значного впливу на модель і ними можна знехтувати.

III. Можливість математичного опису робочого процесу

У роботі [8], проф. д.т.н. Ахмедзяновим Д.А. було проведено дослідження впливу нерівномірного розподілу палива по колектору в процесі заповнення основного паливного колектора з послідовним підключення окремих форсунок на основні параметрів камери згоряння, що характеризують ефективність її роботи. Ним було виявлено значне падіння середньомасової повноти згоряння палива в діапазоні витрат, що відповідають області підключення основного контуру двоконтурної форсунки. Встановлена ним залежність і проведені експериментальні досліді показали, що даний факт потребує подальшого дослідження проблем, що виникають в процесі заповнення основного паливного колектора в складі ГТД. Не зважаючи на те, що робота [8] спрямована на розробку нового типу системи подачі та розподілення палива по основному колектору ГТД, описані експериментальні дані цієї роботи можна використати для вирішення нашої задачі.

Проаналізувавши результати роботи [8], а також описані вище фактори впливу, для дослідження можна прийняти наступну модель: камера згоряння (КЗ) трубчато-кільцевої схеми в ролі середовища роботи системи, колектор основного паливного вузла ГТД із двоконтурними двосопловими форсунками, витратні характеристики яких визначаються на технологічному стенді У-2631-87.

Оскільки на ремонтних експериментальних стендах витратні характеристики визначаються за рівнями у мірних колбах, а розрахунково за масою, то при побудові моделі необхідно врахувати дану залежність.

Масова витрата палива через форсунку визначається за формулою:

$$G = f \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot p}, \quad (3)$$

де f – площа перерізу форсунки; ρ – густина палива; p – перепад тиску палива у форсунці; μ – коефіцієнт витрати форсунки.

сегментів (рис. 3, сегменти заштриховані), і у рівняння балансу площ (1) підставляється вже нова площа f_{ϕ} .

У площу вноситься також поправка при досягненні периферійними факелами стінки жарової труби. Для включення даної поправки, запишемо рівняння для врахування форми жарової труби $\frac{df}{dz} = \varphi(z)$

З врахуванням двоконтурності форсунки, площа перерізу контурів форсунки буде розраховуватись так:

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{Q_1 \cdot \sqrt{\rho}}{3600 \cdot 1000 \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p_1}}, \\ f_2 &= \frac{Q_2 \cdot \sqrt{\rho}}{3600 \cdot 1000 \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p_2}}, \end{aligned} \quad (4)$$

де Q_i – витрата палива по рівню, яка визначається в результаті експерименту (випробування).

Виходячи з формул (3) і (4), залежності масової витрати палива через додатковий контур (G_1) і основний контур (G_2) від перепаду тиску можуть бути представлені в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} G_{1i} &= f_1 \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot p_{1i} \cdot 101325} \\ G_{2i} &= f_2 \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta h_i \cdot 101325}, \end{aligned} \quad (5)$$

де $p_{1i} = \Delta h_i + 12$ (атм.), p_{1i} – перепад тиску палива на форсунці додаткового контуру; і Δh_i – перепад тиску палива на форсунках основного контуру.

Сумарна масова витрата палива через форсунку визначається так:

$$G_{\phi i} = G_{1i} + G_{2i} \quad (6)$$

де G_{1i} – масова витрата через додатковий контур i -ї форсунки; G_{2i} – масова витрата палива через основний контур i -ї форсунки.

Тоді сумарна масова витрата палива у паливному колекторі буде розраховуватись:

$$G_{\Sigma} = \sum G_{1i} + \sum G_{2i} \quad (7)$$

Значення G_{Σ} приходить по паливному потоку з регулятора подачі палива. Далі в елементі вирішується рівняння виду (7) методом Ньютона і визначаються значення перепадів тиску на соплах обох контурів форсунок. За значеннями перепадів тиску розраховуються витрати палива, які проходять через контури форсунок. У свою чергу, визначення сумарної витрати буде залежати від якості експериментального визначення індивідуальних витрат кожної з форсунок, врахування площ перерізів контурів та похибок, які виникають при монтажі елементів.

Отже, відповідно до наведеного опису та аналізу, складемо методологію побудови загальної моделі системи, яка відображатиме процес ремонту паливного колектора, з врахуванням особливостей ремонтних та налагоджувальних робіт. В першу чергу потрібно виконати збір даних по ремонту та виконаним роботам до єдиної електронної бази. Після цього необхідно проаналізувати статистичні дані та побудувати модель відповідно до законів максимальної вірогідності та розподілення випадкових величин. Далі за отриманими результатами зробити експертну оцінку. По оцінках експертів із застосуванням нечіткої логіки побудувати модель передбачення можливих похибок та можливостей налагодження форсунок, які замінюються. І по даних попередніх випробувань побудувати загальну математичну та імітаційну модель нерівномірності розподілу палива по паливному колектору із врахуванням всіх уточнюючих коефіцієнтів по передніх моделях. Таким чином запропонована

методологія повинна покращити загальну методику дослідження та зменшити затрати часу на ремонт та випробування.

Висновок

Проаналізовано методику математичного моделювання робочого процесу колектора основного паливного вузла та фактори, які впливають на сумарні витрати пального. Встановлено вагомі та незначущі фактори робочого процесу, які впливатимуть на побудову моделі.

Наявність математичної та імітаційної моделей при застосуванні відповідного програмного забезпечення та баз даних дадуть можливість створити електронну базу результатів випробувань та вимірювань. Це дозволить в автоматизованому режимі проводити розрахунки та передбачувати поведінку системи в заданих режимах. Введення автоматичного аналізу, проведення розрахунків, а також побудова та аналіз моделей повинно не лише підвищити якість процесу, але і значно зменшити час виконання ремонту за рахунок меншої кількості експериментів, що в свою чергу призведе до зменшення затрат на енергоресурси.

В процесі аналізу вже описаних залежностей та параметрів було визначено основний напрямок побудови моделі та встановлено основні фактори, які впливають на процес. На даному етапі дослідження, за результатами проведеної роботи складено методологію подальшого дослідження.

Список літератури: 1. *Лефевр А.* Процессы в камерах сгорания ГТД. М.: Мир, 1986. – 566 с. 2. *Крайко А.Н.* и др. Механика многофазных сред. Итоги науки и техники. Гидродинамика. М.: Наука, 1972. – т. 6., 174 с. 3. *Раушенбах Б. В.* и др. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1964. – 526 с. 4. *Шилов Г. Е.* Математический анализ функции нескольких вещественных переменных. М.: Наука, 1972. – 624 с. 5. *Вережагин И. П.* и др. Основы электрогазодинамики дисперсных систем. М.: Энергия, 1974. – 346 с. 6. *Бородин В. А.* и др. Распыливание жидкостей. М.: Машиностроение 1967. – 208с. 7. Исследование изменения параметров работы камеры сгорания, в процессе заполнения основного контура двухконтурной форсунки / Д. А. Ахмедзянов [и др.] // Вестник УГАТУ. 2008. – Т. 11, № 2(28). 12-20 с. 8. *В.М. Акимов, В.И. Бакулев и др.* Теория и расчет воздушно-реактивных двигателей / Под ред. С.М. Шляхтенко. Учебник для вузов – 2-е издание, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1987. – 568 с. 9. *Федоров Ю.Н.* Справочник инженера по АСУ ТП: Проектирование и разработка (учебно-практическое пособие для инженеров) / Ю.Н. Федоров. – М.: Инфра-Инженерия, 2008. – 928 с.

Поступила в редколлегию 05.06.2012

УДК 629.4.027

Є.А. АСТАХОВ, докт. техн. наук, провідний науковий співробітник, Інститут електрозварювання ім. Е.О. Патона НАН України, Київ,

В. В. АРТЕМЧУК, канд. техн. наук, доц., Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. В. Лазаряна

НАНЕСЕННЯ ШАРУВАТИХ АМОРФІЗОВАНИХ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ

У статті розглянуті питання формування аморфізованих шарів покриттів в умовах газотермічного напилення. Позначено дві групи чинників, що впливають на утворення

аморфної структури в детонаційних покриттях з металевих сплавів. На основі теоретичного аналізу сформульовані технологічні чинники, що визначають можливість отримання аморфізованих шарів покриттів при детонаційному напиленні.

Ключові слова: газотермічне напилення, шаруваті покриття, аморфна структура, внутрішні напруження

В статье рассмотрены вопросы формирования аморфизированных слоев покрытий в условиях газотермического напыления. Обозначены две группы факторов, влияющие на образование аморфной структуры в детонационных покрытиях из металлических сплавов. На основе теоретического анализа сформулированы технологические факторы, определяющие возможность получения аморфизированных слоев покрытий при детонационном напылении.

Ключевые слова: газотермическое напыление, слоистые покрытия, аморфная структура, внутренние напряжения

The paper deals with the formation of amorphous layers of coatings in thermal spraying. Identified two groups of factors influencing the formation of amorphous structure in detonation coatings of metal alloys. On the basis of theoretical analysis are formulated and technological factors that determine the possibility of obtaining amorphous layers of coatings during detonation spraying.

Keywords: hazotermicheskoe napylenye, sloystye Coating, amorfная structure vnutrennyye voltage

Вступ. Постановка проблеми

Механічна частина рухомого складу – це велика, складна система взаємодіючих між собою вузлів і деталей, що у процесі експлуатації піддаються зносу й іншим видам ушкоджень та безпосередньо впливає на безпеку перевезень. Механічне обладнання локомотивів та вагонів складається з ходових частин, рами, кузова, ударно-тягових приладів та гальмівного обладнання. Крім того, тепловози мають тягову дизельну установку, яка також являє собою складний відповідальний пристрій.

Відмови рухомого складу із-за несправностей механічної частини можуть приводити до серйозних наслідків: зривам графіків руху поїздів, заходам локомотивів та вагонів на неплановий ремонт, і, головне, небезпечним подіям – аваріям, що може спричинити за собою жертви людських життів і пошкодження вантажів.

На механічну частину припадає значна частина несправностей від їх загальної кількості, особливо по тяговому рухомому складу, причому можна зауважити, що спостерігається їх зростання від кузова до колісної пари [1].

Одним із чинників, що значно знижує економічні показники є неплановий ремонт. Наприклад, за даними служби локомотивного господарства Придніпровської залізниці, кількість непланових ремонтів електровозів за 2010 р. збільшилась на 160 випадків у порівнянні з цим же періодом за 2009 р.

Для підтримання рухомого складу в справному стані, високого рівня експлуатаційної надійності, та, насамкінець, забезпечення безпеки руху поїздів ремонтне виробництво повинно мати високу організацію та технологічність. Одним із напрямків, що розв'язує поставлену проблему є розробка та використання сучасних технологій відновлення та зміцнення зношених деталей. Ефективною ланкою розвитку відновлювальних технологій є отримання та використання нових матеріалів, наприклад, композиційних, до яких можна віднести шарувату будову покриття. Метою нанесення шаруватого відновлювального покриття є отримання властивостей відмінних від

властивостей окремих шарів, тобто шари будуються з наперед очікуваними по товщині властивостями.

Аналіз публікацій. Дослідження [2] по напиленню аморфних покриттів із сплавів на основі *Fe* газополум'яним методом із застосуванням ацетилену у якості горючого газу дозволили отримати повністю аморфні покриття товщиною 0,15...0,3 мм. При цьому використовували порошки Fe-Ni-Si-B, Fe-Cr-Ni-P-B, Fe-Ni-P-B та ін. Показана можливість отримання аморфно-кристалічних покриттів з низки сплавів при газополум'яному напиленні без додаткового охолодження із застосуванням горючого газу пропан-бутана [3].

Ефективною технологією формування покриттів з аморфною структурою є напилення, засноване на використанні імпульсного плазмового потоку (імпульсно-плазмове). Плазмовий потік утворюється при розряді ємнісного накопичувача енергії в системі направлених електродів [4]. Нанесення даним методом з порошків Fe-B, Fe-Ni-P, Ni-Nb, Ni-Ti, Ni-P, Ni-Fe-Cr-B-Si, Co-Fe-B-Si та ін. дозволили отримати аморфізовані покриття товщиною до 2...3 мм [5]. Важливим є те, що високі швидкості частинок напилюваного матеріалу, а саме 1000 м/с і вище, забезпечують максимальні ступені деформації на основі, що забезпечує отримання аморфізованих покриттів з високими значеннями швидкості охолодження $V^{охол} \geq 10^7 \text{ K/c}$ [4].

Можливість отримання аморфізованих покриттів товщиною до 1,0 мм і більше теоретично обґрунтована і експериментально доведена при плазмово-дуговому напиленні порошків різних сплавів на основі заліза (Fe-B, Fe-Ni-B, Fe-B-C-Si, Fe-Si-C, Fe-B-C, Fe-Ti-B-C, та інші) [6]. В якості плазмоутворюючого газу використовували аргон або його суміш з азотом. Покриття наносили у відкритій атмосфері з використанням примусового охолодження основи та без нього. В результаті експериментальних досліджень встановлена корозійна стійкість та висока зносостійкість отриманих покриттів [4].

За даними авторів [7] можливе отримання аморфних покриттів товщиною до 2 мм та більше із сплавів Fe-Cr-P-C, Fe-P-C, Fe-B-C при детонаційному напиленні ацетилен-кисневою сумішшю без додаткового охолодження. Досліджені відмінності в концентрації елементів на поверхні та структурі цих покриттів в порівнянні з аморфними стрічками аналогічного складу в широкому інтервалі температур [7].

В наведених вище та інших роботах у більшості випадків для газотермічного напилення застосовували порошки, отримані помолот аморфних стрічок, що, зважаючи на високу вартість початкових стрічок, малоефективно з погляду економічної доцільності. Крім того, існують практичні складності диспергування цих стрічок. До того ж, в роботах недостатньо порівняльних даних по використанню різних напилюваних матеріалів та робочих газів для отримання аморфізованих покриттів, не наведені раціональні технологічні параметри, які забезпечують формування та збереження аморфної структури напилених шарів в процесі напилення та експлуатації. Метою представленої роботи є визначення умов формування аморфізованих шарів та вивчення деяких властивостей отриманого покриття.

Методика експерименту. Для напилення використовували різні матеріали, у тому числі сплави Fe-B, Fe-B-C, Fe-Cr-B-Ni-C, Fe-Ni-Cr-Mo-B, Fe-Cr-B-Si та інші. Вказані матеріали були обрані з різних міркувань, у тому числі із розрахунку того, що вони мають відносно невисоку вартість, особливо матеріали (порошки) з вмістом Fe не менше 70 %. Напилення проводили порошками різної фракції (5...40, 50...63, 63...100 и 100...160 мкм). Покриття наносили на зразки із сталі 45 на автоматичному детонаційному комплексі «ПЕРУН-С» [3] із застосуванням ацетілен-кисневої і пропан-бутан-кисневої сумішей. Витрату напилюваного матеріалу на кожен постріл підтримували у всіх дослідах постійним (товщина за постріл складала приблизно 8...10 мкм). Напилення проводили в інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

Виклад основного матеріалу.

Дослідження некристалічних матеріалів [2] показують, що будь-яка речовина може існувати в некристалічному стані в тій або іншій формі. Речовини з аморфною та кристалічною структурою характеризуються наявністю областей з ближнім порядком. Можна припустити, що ближній порядок існує в безпосередньому оточенні будь-якого атома, хоча б в ослабленій формі, а зі збільшенням відстані зростає різноманіття структурних конфігурацій, що приводить до зміни взаємної орієнтації структурних елементів.

Одним із методів отримання аморфізованої структури є газотермічне напилення, особливістю якого є розплавлення аморфізуючого сплаву в об'ємі високотемпературного газового струменя з подальшою спрямованістю потоку розплавлених частинок на деталь. Це стосується всіх методів ГТН незалежно від способу створення високотемпературного газового струменя, особливостей і швидкостей витоку струменя.

Газотермічне напилення залежить від багатьох чинників, але цей складний процес умовно можна поділити на такі етапи:

- нагрівання і розплавлення матеріалу, що напилюють;
- прискорення крапель розплаву;
- деформацію та твердіння розплавлених часток на поверхні.

В перший момент зіткнення розплавленої частинки з поверхнею основи в місці контакту частинка пружно деформується та через 10^{-10} ... 10^{-9} с в місці контакту утворюється тонкий плоский шар розплаву частинки. В процесі деформації частинка розтікається, а висота частинки зменшується.

Детонаційне напилення формує шар та поступове зростання його товщини. Як правило, товщина шару, що наноситься за один цикл, не перевищує 20 мкм, частота нанесення шарів до 10 Гц, що забезпечує твердіння шару до нанесення наступного, оскільки при цих частотах час твердіння часток менше на декілька порядків. Кожен шар при детонаційному напиленні твердіє окремо. Це означає, що кожний попередньо нанесений шар не піддається додатковому термічному впливу від наступного напилюваного матеріалу. Високі швидкості охолодження дозволяють збільшити масу швидкозагартованого сплаву послідовною добавкою малих порцій розплаву.

Обов'язковою умовою при гартуванні з рідкого стану є розплавлення сплаву перед його зіткненням з основою або попереднім шаром. При детонаційному

напиленні, яке має етапи: нагрів напилюваного матеріалу, перенесення розплавлених часток та їх зіткнення з основою можна представити у вигляді: $T_0 \geq T_m$ де T_0 – температура частинки в початковий момент охолодження після зіткнення з основою; T_m – температура плавлення напилюваного матеріалу.

Для теоретичної оцінки об'ємного змісту аморфної фази матеріалу покриття можна розглянути відносно розташування кривих охолодження на температурочасовому полі напилених частинок та термодинамічній діаграмі конкретного сплаву «температура–час–перетворення» (ТТТ-діаграма) (рис. 1).

Якщо крива охолодження огинає вітку ТТТ-діаграми, що відповідає нехтовно малій кристалічній фазі, рівній 10^{-6} с, то напилені частинки мають повністю аморфну структуру. При зрушенні кривих охолодження вправо частинки мають аморфно-кристалічну або повністю кристалічну структуру.

Ступінь аморфізації покриття визначають графічно: крива охолодження є дотичною до С-образної кривої, що відповідає певному значенню об'ємного змісту кристалічної фази – z . Час, необхідний для утворення малої частки кристалів Z з врахуванням кінетики аморфізації як зародження, так і зростання кристалічних фаз при постійності частоти зародження I та лінійній швидкості росту кристалів U , визначимо із співвідношення [8]

$$\tau_z = \left(\frac{3ZU^{-3}}{\pi I} \right)^{0,25} \quad (1)$$

Після певних перетворень рівняння (1) та припущень криві «час–температура–перетворення» знаходять за виразом [9]:

$$\tau_z = \frac{9,3\eta(T)}{kT} \cdot \left\{ \frac{Zd_a^9 \exp\left(-\frac{1,07}{\Delta T_l^2 T_q^3}\right)}{f^3 N_V \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta H_m \Delta T_q}{RT}\right)\right]^3} \right\}^{0,25}, \quad (2)$$

де $\eta(T)$ – в'язкість розплаву;

d_a – середній атомний діаметр;

N_V – число атомів в одиничній комірці;

f – відносна кількість комірок на поверхні розділу «розплав-кристал», в яких може відбуватися перенесення атомів (для гладких поверхонь $f = 0,2\Delta T_q$);

T_m – температура ліквідусу;

ΔH_m – молярна теплота плавлення сплаву.

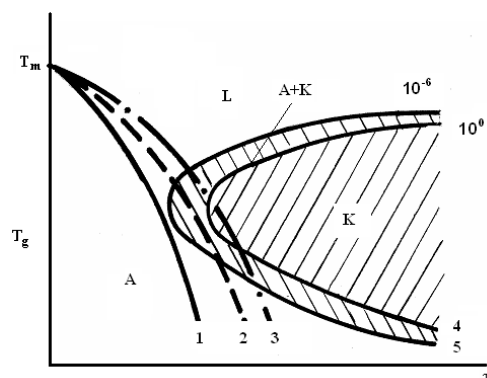


Рис. Схема процесу твердіння напилених частинок [12]: 1, 2, 3 – криві охолодження; 4, 5 – криві ТТТ-діаграм; L – розплав; А – аморфний стан; К – кристалічний стан; T_g – температура скловання

$$\text{При цьому } T_q = \frac{T}{T_m}, \Delta T_q = \frac{(T_m - T)}{T_m}.$$

Величину критичної швидкості охолодження визначають за наступним виразом:

$$V_{кр} = \frac{T_m - T_1}{\tau_1} \quad (3)$$

де T_1 та τ_1 - температура та час, що відповідають виступу С-образних кривих. При детонаційному напиленні, цю умову можна представити у вигляді:

$$T_0 = T_n + \Delta T_{нагр} - \Delta T_{охол} + \Delta T_{уд} \geq T_m, \quad (4)$$

де T_0 – температура частинок в початковий момент охолодження на основі;

T_n – початкова температура матеріалу перед напиленням;

$\Delta T_{нагр}$ – нагрів частинки після взаємодії з продуктами згоряння;

$\Delta T_{охол}$ – охолодження частинки при її русі за зрізом ствола;

$\Delta T_{уд}$ – нагрів частинки при її зіткненні з основою;

T_m – температура плавлення напилюваного матеріалу.

Теплові процеси при взаємодії напилюваного матеріалу з основою є визначальними у формуванні заданого фазового складу покриття. Вирішивши завдання охолодження тонкої плівки на напівнескінченній підкладці, можна отримати значення швидкостей охолодження для окремої частинки, що зіткнулась з основою, проте покриття формують нарощуванням швидкозагартованих частинок, та при поступовому збільшенні товщини покриття частинки охолоджуються через напилений шар. Тому значення швидкостей охолодження змінюватимуться залежно від товщини покриття. В процесі нарощування товщини покриття зміни умов охолодження можна апроксимувати ефективний коефіцієнт теплопередачі α_{ef} , який враховує термічний опір покриття та меж між частинкою, що твердіє та покриттям, самим покриттям й основою [10]. Розглядаючи перенесення теплового потоку через покриття, як задачу теплопередачі через однорідну стінку при допущенні одновимірності теплового потоку, отримаємо [10]:

$$\alpha_{ef} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (5)$$

де α_1 - коефіцієнт тепловіддачі на межі розділу покриття-основа;

α_2 - коефіцієнт тепловіддачі на межі розділу частинка-покриття;

δ_n - товщина покриття;

λ_n - теплопровідність покриття.

Закон зміни температури твердіючої частинки може бути представлений на основі рішення рівняння теплопровідності Фур'є [11]:

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\theta_0 2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} \cdot \cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{a\tau}{\delta^2}\right), \quad (6)$$

де $\theta = T_q - T_n$, $\theta_0 = T_0 - T_n$;

a - температуропровідність частинки;

x - товщина шару частинки в напрямі від підкладки до вільної поверхні;

T_n - температура підкладки;

t - час;

T_q - температура частинки;

T_0 - температура частинки в початковий момент охолодження.

Диференціювання рівняння (6) за часом дає наступний вираз для швидкості охолодження:

$$V_{охл.} = \frac{a}{\delta^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\theta_0 \mu_n^2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} \cdot \cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{a\tau}{\delta^2}\right). \quad (8)$$

Дані фізико-математичного моделювання дозволяють виділити дві групи чинників, що впливають на утворення аморфної структури в детонаційних покриттях з металевих сплавів. До першої групи відносять початкову температуру розплавлених частинок, теплофізичні властивості матеріалу основи, товщину покриття. До другої – товщину напилених частинок, температуру основи та ступінь досконалості контакту між напиленою частинкою та основою, які більше впливають на утворення аморфної фази. Об'єм деформованої частинки можна оцінити як суму об'ємів, що заповнюють попередню мікрошорсткість та твірну власну мікрошорсткість.

З точки зору аморфізації напилюваного матеріалу швидкість можна вважати раціональною та визначати, як:

$$\frac{df(K_a)}{dV_q} = 0 \quad (11)$$

де $f(K_a)$ - параметр аморфізації - відношення висоти охолоджуваної частинки до ефективної площі тепловідводу залежно від швидкості підльоту напилюваних частинок V_q .

З наведеного вище можна визначити раціональні технологічні параметри детонаційного напилення [12]:

$$\frac{V_q}{C_{пд}} = \left(-\frac{8L_3}{3 \frac{C^{0,5}}{K_1 K_2} \frac{\rho_q d_q}{\rho_0}} \right)^{0,5} \quad (12)$$

де L_3 - глибина завантаження напилюваного матеріалу в ствол детонаційної установки;

$C_{пд}$ - швидкість звуку в продуктах детонації;

K_1 - коефіцієнт аеродинамічного опору напилюваних частинок;

K_2 - коефіцієнт втрат динамічного тиску з-за тертя продуктів згорання об стінки ствола і опору частинок;

ρ_0 - щільність вибухової суміші в початковому стані;

d_q - діаметр частинки.

Визначивши теоретичні передумови отримання аморфізованих покриттів, для їх ефективного практичного використання необхідно визначення властивостей цих матеріалів, наприклад міцності зчеплення, зносостійкості, втомної міцності та ін. Однією з важливих характеристик покриття є напруження, що виникають в ньому при напиленні та після закінчення процесу. Природа виникнення залишкових напружень полягає у нагріванні частинок, покриття і

деталі в процесі напилення та їх подальше охолодження до температури навколишнього середовища. Причому в покритті виникають залишкові напруження і I роду (розподілені в обсязі всієї деталі (зразка) з покриттям), і II роду (напруження на рівні напилених частинок). З погляду впливу цих напружень на покриття для відновлення деталей рухомого складу найбільший інтерес представляє виявлення напружень I роду, оскільки саме ці напруження суттєво впливають на міцність зчеплення з основою та втомну міцність всього покриття. Встановлено, що на залишкові напруження I роду впливають безпосередньо режими напилення (термічний вплив), коефіцієнт термічного розширення (КТР) шарів покриття, модуль пружності окремих шарів.

З літературних джерел відомо, що різні легуючі елементи по-різному впливають на залишкові напруження, наприклад, при однаковій товщині покриття додавання у сплав хрому *Cr* або молібдену *Mo* сприяє підвищенню напружень стискування, а нікелю *Ni* – розтягування.

Питання виникнення залишкових напружень в напилених матеріалах, у тому числі, аморфізованих, достатньо широко висвітлено в роботах [13 – 17]. Враховуючи існуючий експериментальний матеріал та власні дослідження $\sigma_{зал}$ матеріалів Fe-Cr-B-Si та Fe-Ni-Cr-Mo-B, розглянемо можливість застосування шаруватих аморфізованих покриттів з метою регулювання напружень або отримання допустимого рівня $\sigma_{зал}$. Товщина покриття зразків складала 1 мм, що є достатнім для відновлення багатьох циліндричних деталей типу «вал» механічної частини рухомого складу. Покриття наносили плазмовим, плазмово-дуговим та детонаційним методами.

За даними [...] найбільші значення міцності зчеплення з основою мають покриття сплавів Fe-B та Fe-Ni-B, причому при 15 % вмісту бору формуються залишкові напруження розтягу (до +25 МПа). Збільшення вмісту бору до певних значень приводить до утворення стискаючих напружень. В цьому сенсі найбільш вигідне використання сплаву Fe₈₀B₂₀, в якому $\sigma_{зал}$ мінімальні, а $\sigma_{зч}$ при цьому максимальна (до 50 МПа). Збільшення вмісту бору до 25 % приводить до збільшення стискаючих напружень (до – 50 МПа), але при цьому міцність зчеплення знижується. Даний факт є дещо неочікуваним, оскільки позитивний вплив стискаючих напружень добре відомий.

Таким чином, можна зробити висновок про дію конкуруючих механізмів в напиленому покритті. Проте, зважаючи на наведене, можна визначитись з першим (адгезійним) шаром, яким цілком може бути сплав Fe₈₀B₂₀. До того ж цей сплав має невисоку вартість, що також є позитивним для виробництва. Товщину адгезійного шару (Fe₈₀B₂₀) можна рекомендувати на рівні 0,15...0,20 мм. Далі в залежності від потреб виробництва (поставленої задачі) можуть бути використані зносостійкі матеріали. Вибір того або іншого матеріалу ґрунтується на техніко-економічних показниках вихідних матеріалів. В даній роботі порівняльні трибологічні характеристики матеріалів не наводяться, але стисло можна зазначити, що для умов граничного тертя показали високу ефективність матеріали Fe-Cr-B-Si (Fe₇₀Cr₁₅B₁₁Si₄), Fe-Ni-Cr-Mo-B, Fe-B-Si-C, Fe-Ni-B та інші сплави на основі заліза, що буде показано в окремій роботі. Оскільки з точки зору зносостійкості вигідно використовувати різні легуючі елементи (в залежності від

умов роботи трибопари), то далі пропонується наносити шари з різних матеріалів. Наприклад, якщо наноситься шар із вмістом хрому або молібдену, або іншим елементом, що утворює напруження стискання, то наступним шаром повинен бути шар, який містить нікель. Співвідношення товщин шарів залежить від рівня залишкових напружень в кожному шарі, який у свою чергу, залежить від масової частини легуючих компонентів. Як показали проведені експерименти, такий підхід дозволяє значно зменшувати залишкові напруження (до 50 %), хоча треба зауважити, що отримати покриття з практично нульовим рівнем залишкових напружень досягти не вдалося. Можна припустити, що даний факт пов'язаний зі складністю точного моделювання, розрахунку та нанесення визначених товщин шарів. Однак в цілому експерименти підтверджують справедливність зроблених припущень. Останній (технологічний) шар пропонується наносити зі сплаву Fe-V для забезпечення гарної оброблюваності при шліфуванні та припрацювання. Методика розрахунку раціональних товщин шарів відновлювального покриття, яка може бути застосована для розглядуваного випадку, наведена в роботі [18].

Висновки. З погляду на широкі можливості аморфних покриттів дослідження їх властивостей та умов отримання потребує подальшого глибокого вивчення та використання для відновлення деталей рухомого складу залізниць. При отриманні аморфізованих шарів суттєвий вплив мають багато факторів, які можна об'єднати в групи. Головними серед цих факторів є швидкість польоту та температура частинок, температура онови деталі; інші фактори таким або іншим чином впливають на зазначені. Наявність аморфної фази впливає на рівень та знак залишкових напружень, що можна використовувати при нанесенні газотермічних покриттів. При раціональному отриманні шарів з різними легуючими елементами та товщинами можна впливати на властивості покриття в цілому.

Список літератури: 1. Механическая часть тягового подвижного состава. / Под ред. Бирюкова И.В. – М: Транспорт, 1992. – 440 с. 2. Miura H. Production of amorphous iron-nickel based alloys by flame - spray quenching and coatings on metal substrates [Text] / H. Miura, S. Isa, K. Omuro // Trans. Of the Japan Inst. for Met. -1984. -25, № 4, - P. 291-294. 3. Кудинов В. В. Нанесение покрытий плазмой [Текст] / В. В. Кудинов, Л. Ю. Пекшеев, В. Е. Белащенко. - М.: Наука, 1990. - 407 с. 4. Борисов Ю. С. Формирование структуры покрытий из эвтектических сплавов при газотермическом напылении [Текст] / Ю. С. Борисов, В. Н. Коржик, Ю. А. Куницкий // Тр. III Всесоюзной конф. «Закономерности формирования структуры сплавов эвтектического типа». Т. 1. – Д.: Днепропетр. металлургический ин-т. - 1986. - С. 34-36. 5. Лукина Г. Н. Структура и свойства импульсно-плазменных покрытий из порошков металлических материалов Fe-Mo-Cr-V [Текст] / Г. Н. Лукина, М. В. Большаков // Автоматическая сварка. - 1997, № 3. - С. 14-18. 6. Борисов Ю. С. Образование аморфных структур в металлических сплавах при газотермическом напылении [Текст] / Ю. С. Борисов, В. Н. Коржик. – К., 1986. - 64 с. (Препринт АН УССР. Ин-т проблем материаловедения; № 10). 7. Шмырева Т. П. Особенности образования аморфной структуры в металлических сплавах при детонационно-газовой обработке [Текст] / Т. П. Шмырева, В. М. Матухнов, А. С. Аронин // Вопросы формирования метастабильной структуры сплавов. Неровновестная кристаллизация. – Д.: ДНУ, 1987. - С. 109-114. 8. Скаков Ю. А., Крапошин В. С. Затверждение в условиях сверхбыстрого охлаждения и фазовые превращения при нагреве металлических стекол / Ю. А. Скаков, В. С. Крапошин // Итоги науки и техники. Металловедение и термическая обработка металлов. -1980. - № 13. - С. 3-78. 9. Быстрозакаленные металлы [Текст] / под ред. А. Ф. Прокошина. - М.: Металлургия, 1983. - 472 с. 10. Мирошниченко И. С. Закалка из жидкого состояния / И. С. Мирошниченко. - М.: Металлургия, 1982. - 168 с. 11. Ильин А. И. Стеклообразные структуры подвергнутые действию

высокоэнергетических пучков [Текст] / А. И. Ильин, В. С. Крапошин // Поверхность. Физика, химия, механика. - 1985. - № 6. - С. 5-16. **12.** Астахов Е. А. Детонационное напыление аморфных и микрокристаллических покрытий [Текст] / Е. А. Астахов, В. Н. Коржик, А. В. Чернышев. - Брошюра общества «Знание». СССР, 1990. - 20 с. **13.** Вирник А.М., Морозов И.А., Порзей А.В. К оценке остаточных напряжений в покрытиях, нанесенных плазменным напылением // Физика и химия обработки материалов. - 1970. - № 4. - С. 53 - 58. **14.** Никитин М.Д., Кулик А.Я., Захаров И.Н. Напряженное состояние плазменных покрытий // Физика и химия обработки материалов. - 1978. - №2. - с. 131 - 136. **15.** Борисов Ю.С., Козьяков И.А., Коржик В.Н., Миц И.В., Бобрик В.Г. Структура и свойства газотермических из порошковых проволок Fe-Cr-B и Fe-Cr-B-C // Автоматическая сварка. - 1996. - № 5. - С. 21 - 24. **16.** Борисова А.Л., Бобрик В.Г., Борисов Ю.С., Коржик В.Н., Гордань Г.Н., Борисов В.В., Петров С.В. Влияние русловий плазменного напыление на структуру покрытий из сплава Fe-Mo-Cr-Ni-V // Автоматическая сварка. - 1995. - № 7. - С. 28 - 34. **17.** Коржик В.Н., Борисова А.Л., Губенко Б.Г., Чернышов А.В., Дармохвал В.Т. Особенности структурного состояния аморфно-кристаллических газотермических покрытий из никелевых и железных сплавов // Труды III Международной н/т конференции «Упрочнение и защита поверхности газотермическим и вакуумным напылением». - Киев: ИЭС им. Е.О. Патона АН Украины. - 1991. - С. 37 - 45. **18.** Артемчук В.В. Визначення раціональних параметрів шаруватого покриття при відновленні зношених деталей // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2012. - № 2. Т.13(56). - С. 3 - 8.

Поступила в редколлегию 08.06.2012

УДК 621.762.55

О.О. ГОНЧАРУК, асис, НТУУ «КПІ», Київ,
Л.Ф.ГОЛОВКО, докт. техн. наук, проф., НТУУ «КПІ», Київ,
В.Г.СОРОЧЕНКО, с.н.с., Інститут надтвердих матеріалів ім.В.М.Бакуля, Київ,
А.М.ЛУТАЙ, ст.викл., НТУУ «КПІ», Київ,
О.Д. КАГЛЯК, асис, НТУУ «КПІ», Київ

ВПЛИВ ЛАЗЕРНОГО ОПРОМІНЕННЯ З РІЗНОЮ ДОВЖИНОЮ ХВИЛІ НА МІЦНІСТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ

Повідомляються результати досліджень по впливу прямого лазерного опромінення на міцність при статичному навантаженні шліфпорошків кубічного нітриду бору. Обговорюються питання використання розглянутих шліфпорошків в процесах лазерного формування інструментальних композитів на зв'язках з різною температурою плавлення. Розглянуті методи захисту шліфпорошків від перегріву в процесі формування абразивного шару.

Ключові слова: лазерне випромінювання, спікання, кубічний нітрид бору, статична міцність.

Сообщаются результаты исследований по влиянию прямого лазерного облучения на прочность при статической нагрузке шлифпорошков кубического нитрида бора. Обсуждаются вопросы использования рассмотренных шлифпорошков в процессах лазерного формирования инструментальных композитов на связках с различной температурой плавления. Рассмотрены методы защиты шлифпорошков от перегрева в процессе формирования абразивного слоя.

Ключевые слова: лазерное излучение, спекание, кубический нитрид бора, статическая прочность.

We report the results of studies on the effect of direct laser irradiation on the strength of the static load of cubic boron nitride grinding powders. We discuss the issue of grinding powders considered in the

process of laser forming tool contacts composites with different melting points. The methods of protection against overheating of grinding powders in the process of forming an abrasive layer.

Keywords: laser irradiation, sintering, cubic boron nitride, strength.

1. Вступ

У сучасному інструментальному виробництві широко використовуються різноманітні високопродуктивні швидкорізальні сталі, леговані вольфрамом, кобальтом, ванадієм, молібденом, які мають підвищену твердість й зносостійкість. Однак ефективне використання нових марок швидкорізальних сталей у виробництві стримується через відносно погану їх оброблюваність абразивними інструментами, низькою ріжучою здатністю кругів зі звичайних абразивів і неминучою появою на оброблюваних поверхнях підпалів. Високі температури й швидкості нагрівання поверхневих шарів, що виникають у зоні різання при шліфуванні кругами з електрокорунду, викликають фазові й структурні зміни, а внаслідок циклічного високотемпературного нагрівання й охолодження поверхневих шарів при роботі із СОЖ, виникає сітка мікро- і макротріщин. Підпали приводять до зниження твердості й інших фізико-механічних властивостей ріжучих поверхонь інструментів, у результаті чого істотно погіршується їх працездатність. Застосування шліфувальних кругів із КНБ (ельбора, кубоніта і гексаніта-А) дозволяє успішно вирішити проблему якісної й продуктивної обробки інструмента зі швидкорізальної сталі.

Розширення використання нових важкооброблюваних конструкційних матеріалів вимагає створення високоефективних інструментів, у тому числі на основі кубічного нітриду бору (КНБ). Кристали кубічного нітриду бору залежно від марки мають високу твердість і теплостійкість (від 800°C до 1200°C). При температурах, що перевищують ці значення, протікають процеси окислення, які приводять до втрати їхньої міцності. Специфічні властивості щільних модифікацій нітриду бору (високі твердість, хімічна стійкість, термостійкість і ударна в'язкість) відкривають широкі перспективи для створення нових класів абразивного інструмента з унікальними характеристиками й функціональними можливостями. Особливо ефективно застосування таких інструментів при обробці різних залізовмісних сплавів, оскільки при цьому забезпечується різке зниження (у порівнянні з алмазним) адгезійного й дифузійного їхнього зношування.

Головним напрямком у сучасній технології спікання порошкових матеріалів є використання високошвидкісного нагрівання, що дозволяє радикально збільшити продуктивність і оптимізувати процес спікання, одержувати матеріали з високою щільністю й дрібнозернистою структурою [2]. У зв'язку із цим, з'явився ряд неізотермічних методів, серед яких варто виділити метод спікання металевих порошків прямим пропусканням електричного струму [3], а також застосуванням лазерного нагрівання [1,4,5,6,7].

Основними параметрами, які визначають фізико - хімічні процеси, що протікають у поверхневому шарі при лазерному спіканні композитів із надтвердих матеріалів (НТМ) є температура і час нагрівання, швидкість охолодження. Ці параметри знаходяться в прямій залежності від ряду факторів, пов'язаних з лазерним променем, складовими порошкової суміші та умовами

реалізації технологічного процесу спікання. Кінцевою метою лазерного спікання є забезпечення поверхневого шару композита заданих фізико-механічних і експлуатаційних властивостей. Між фізико-хімічними процесами і експлуатаційними характеристиками існує опорядкований зв'язок через якісні характеристики сформованого поверхневого шару композиту із НТМ. Встановлення цих взаємозв'язків дозволяє проектувати технологічні процеси, які забезпечують отримання гарантованого результату, планувати проектно-виробничі системи, які включають в себе лазерне спікання композитів із НТМ інструментального призначення.

Постановка задачі

Метою даного дослідження є вивчення процесу взаємодії лазерного випромінювання із зернами КНБ, впливу параметрів обробки на характеристики міцності в залежності від марки і зернистості, структури й властивостей розглянутих шліфпорошків, створити базу даних для розробки технології виготовлення високопродуктивного інструменту, оснащеного ріжучими елементами, сформованими лазерним спіканням.

Методика дослідження

Основним завданням дослідження є визначення максимальних значень температур швидкісного лазерного нагрівання різних шліфпорошків КНБ і відповідних їм умов опромінення, при яких не спостерігається зниження їх міцності і ріжучих властивостей. Для його вирішення необхідно:

- вивчити вплив лазерного опромінення на процес нагрівання й міцність зерен КНБ;
- визначити умови лазерного нагрівання, що не знижують абразивні здатності зерен КНБ;
- обґрунтувати технологічні режими лазерного нагрівання й діапазони температур, що дозволяють використовувати лазерне спікання інструментальних композитів, яке забезпечує збереження вихідних властивостей зерен КНБ і високу міцність їх закріплення у зв'язці.

Лазерне опромінювання дослідних зразків виконували на лазерних технологічних комплексах на базі "ЛАТУС 31" (CO₂ – лазер, довжина хвилі $\lambda=10,6$ мкм) і YAG:Nd – лазера «DY044» з довжиною хвилі випромінювання $\lambda=1,06$ мкм. При обробці на "ЛАТУС 31" використовувались наступні технологічні параметри: обробка проводилася на повітрі при різних густині потужності випромінювання в межах $W_p = (0.3 - 6.37) \times 10^4$ Вт/см² і часі обробки $\tau=0,15-0,45$ сек.

Лазерний технологічний комплекс «DY044» дозволяв варіювати параметри обробки в широких межах. Зразки піддавалися лазерному опроміненню на повітрі й при додатковому захисті, в середовищі аргону з витратою 2-20 л/хв, щільності потужності в межах $W_p = (0.1 - 1.4) \times 10^4$ Вт/см² і часі обробки $\tau=0,06-4,5$ сек.

Обробка всіх зразків проводилася при розташуванні крапки старту й зупинки променя за межами зразка на відстані 40 мм, для запобігання процесів перегріву зразків і рівномірності швидкості обробки.

Прямий вплив лазерного опромінення на КНБ визначався за методикою, розглянутою в [8]. Для дослідження були обрані найпоширені шліфувальні

порошки марок KB та КР (металізовані Ni), вихідна міцність при статичному навантаженні яких представлена в таблиці. Визначення показника статичної міцності шліфпорошків КНБ проводили за стандартною методикою на приладі моделі ДА-2. При цьому визначалось значення статичного навантаження, що руйнує зерна КНБ, розміщених між двома паралельними пластинами.

Таблиця - Вихідна міцність при статичному навантаженні

Шліфпорошок КНБ	Міцність зерен, Н	
	Дані вимірів	Дані вимірів виробників
KB 250/200	13,8	13,2
КР 315/250 (Н160%)	16,9	-
КР 250/200	8	-
CBN 100	13	-

Для визначення умов ефективного використання енергії лазерного випромінювання та оптимальних технологічних параметрів та умов лазерного спікання функціональних композитів необхідно встановити закономірності поглинальної здатності композиту і його складових.

Ефективність використання енергії лазерного променя залежить від співвідношення відбитого і поглиненого випромінювання. Одна частина променя, як правило, безповоротно втрачається, друга – проникає на невелику глибину в матеріал і при поглинанні переходить у тепло. Взаємозв'язок цих часток визначається співвідношенням $R = I - A$, де R і A - віддзеркалена і поглинальна здатність матеріалу.

Для виміру поглинання матеріалами лазерного випромінювання розроблено експериментальний пристрій на базі технологічного лазера "Квант-15" імпульсно-періодичної дії (рис. 1), що включає в себе столик 4, конструкція якого забезпечує можливість повороту досліджуваного зразка 5 у межах від 0 до 15°, і приймач відрядженого сигналу 1. Останній за допомогою схеми комутації 2 з'єднаний із приладом, що аналізує, 3. Як приймач відбитого сигналу використовується фотодіод, сигнали з якого через ланцюжок інтегрування надходять на вхід осцилографа.

Розгорнення осцилографа засинхронізоване із СУМом (Система управління модулятором) 6 лазерної установки. Для одержання прямого відбитого сигналу від поверхні опроміненого матеріалу, столик фіксується в положенні "0". При цьому вертикальне розгорнення осцилографа настроєне так, що у випадку опромінення дзеркала з 100%-ою

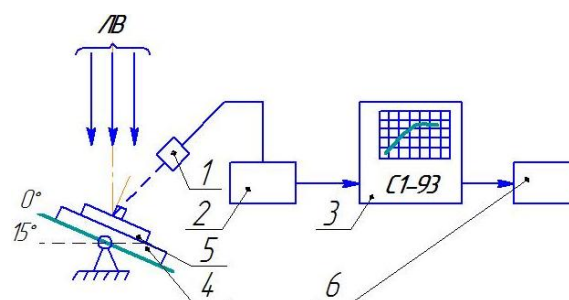


Рис. 1. Експериментальний пристрій вимірювання поглинальної здатності матеріалів лазерного випромінювання

відбивною здатністю при енергії лазерного випромінювання $E_d = 10$ Дж на екрані осцилографа одержуємо сигнал висотою $I_{отр} = 10$ см.

Отже, поглинальна здатність матеріалу може бути оцінена по залежності

$$A = \left(\frac{1 - I_{\text{отр}}}{E_{\text{л}}} \right) \cdot 100\%$$

де $I_{\text{отр}}$ - інтенсивність відбитий сигнал на екрані осцилографа; $E_{\text{л}}$ - енергія лазерного випромінювання, Дж.

Результати досліджень та їх обговорення

На рис. 2 – 3 наведені графічні залежності поглинальної здатності матеріалів від температури при їх нагріванні лазерним випромінюванням з довжиною хвилі 1,06 мкм, які, як відомо, достатньо добре поглинається металами.

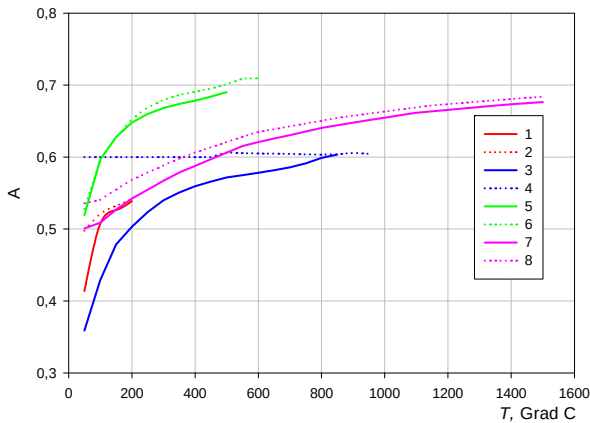


Рис. 2. Залежність поглинальної здатності А суцільних матеріалів від температури спікання: 1, 2 – мідь, перший і другий імпульс; 3, 4 – цирконій, перший і другий імпульс; 5, 6 – сталь 65 Г, перший і другий імпульс; 7, 8 – КНБ марки КВ 250/200, перший і другий імпульс

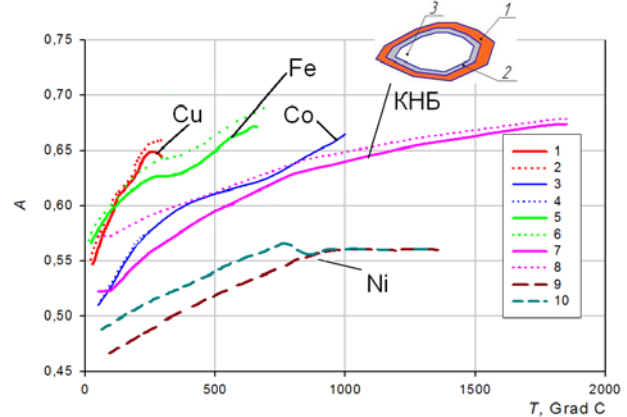


Рис. 3. Залежність поглинальної здатності А порошкових матеріалів від температури: 1, 2 – мідь, перший імпульс; 3, 4 – цирконій, перший і другий імпульс; 5, 6 – залізо, перший і другий імпульс; 7, 8 - КНБ марки КВ 250/200, перший і другий імпульс; 9 – нікель, другий імпульс; 10 – кобальт, другий імпульс

Таким чином, виконаний енергетичний аналіз процесу лазерного спікання показав, що певна частка енергії лазерного випромінювання (14%, при товщині спеченого шару $>0,4$ мм і 60% при меншій товщині $< 0,3$ мм) витрачається на процес нагрівання і оплавлення матеріалу основи, (60–20%) енергії витрачається на нагрівання і оплавлення порошкового матеріалу (в залежності від його витрати), 15–20% енергії витрачається непродуктивно в результаті відбивання і незрівнянно мало на процеси структурно-фазових перетворень (6–10%), радіаційне випромінювання (5–10%) і конвективну взаємодію з навколишнім середовищем (5–10%). Із збільшенням продуктивності спікання переважно зростають витрати енергії на нагрівання порошку.

Для підвищення ефективності використання кубічного нітриду бору при лазерному формуванні абразивних інструментів запропонований спосіб захисту монокристалу від термічного впливу лазерного випромінювання. В основу способу поставлене завдання підвищення ефективності використання сформованого на абразивному зерні захисного шару й підвищення експлуатаційних показників отриманого

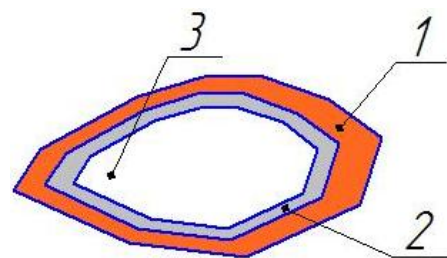


Рис. 4. Монокристал КНБ із функціональним захисним покриттям

інструментального композиту. Поставлене завдання вирішується тим, що на зерно абразива (поз.3) наноситься кілька функціональних шарів різних матеріалів (рис.5), які забезпечують високу адгезію покриття до поверхні абразивного зерна, високу твердість покриття (поз.2), високу відбиваючу здатність, що до лазерного випромінювання, здатність утворювати загальні з'єднання з матеріалом зв'язки (поз.1).

Використання зазначеного способу дозволяє збільшити теплову стійкість абразивного матеріалу й значно розширити спектр виготовлення використовуваних інструментальних композитів. Даний спосіб захищений охоронним документом [9].

Аналіз результатів виміру міцності шліфпорошків КНБ при статичному навантаженні показав, що шліфпорошки всіх марок, при нагріванні випромінюванням з довжиною хвилі $\lambda=10,6$ мкм і швидкістю переміщення від 0,2 до 2,0 м/хв при щільності потужності $W_p = (0,2 - 2,5) \times 10^4$ Вт/см², практично не втрачають своєї вихідної міцності. Спостерігається невелике падіння міцностних характеристик у межах 10-15%, про що свідчать дані наведені на діаграмах рис. 5.

Наявність зерен КНБ, які мають після лазерного впливу низьку міцність 2,6 Н, що приблизно в 5 - 6 разів нижче, ніж аналогічний показник у вихідних шліфпорошків, свідчить про присутність у вибірці графітоподібного α -BN, BN_{гp}, що служить вихідним матеріалом при утворенні β -BN, BN_к у присутності металів (їхніх нітридів і боридів) лужної та лужноземельної груп періодичної системи елементів, які мають низьку вихідну міцність і потрапили у вибірку випадково, у вигляді зерен білого кольору.

Дещо інша картина розподілу статичної міцності шліф порошків, які оброблялись випромінюванням $\lambda=1,06$ мкм. Діаграми виміру їх статичної міцності представлені на рис. 6.

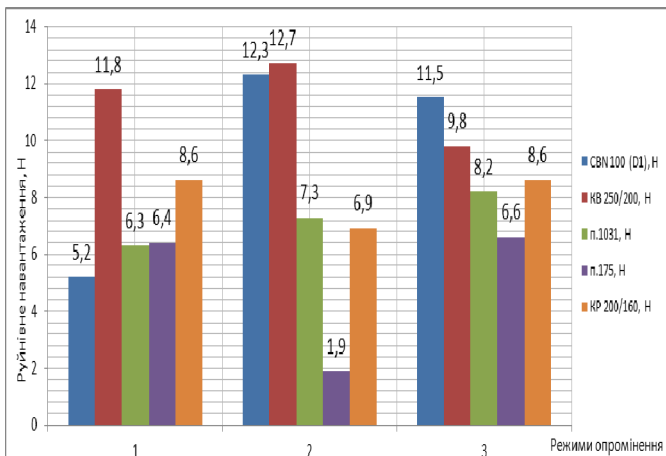


Рис. 5. Діаграми розподілу статичної міцності шліфпорошків різних марок в залежності від швидкості переміщення й діаметра лазерного променя при: довжині хвилі $\lambda=10,6$ мкм: 1 - d=7 мм; V=0,8 м/хв; P=800 Вт; 2 - d=7 мм; V=1,4 м/хв; P=800 Вт; 3 - d=7 мм; V=2,0 м/хв; P=800 Вт

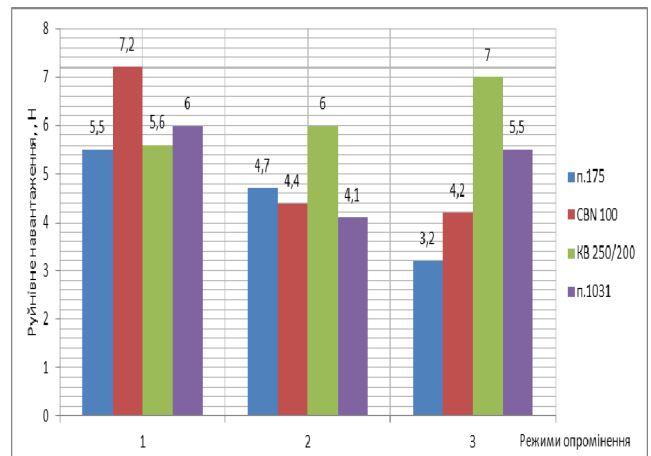


Рис.6. Діаграми розподілу статичної міцності шліфпорошків різних марок при різних швидкостях переміщення й потужності лазерного випромінювання: довжина хвилі $\lambda=1,06$ мкм: 1 - d=3 мм; V=0,1 м/хв; P=300 Вт; 2 - d=3 мм; V=1,4 м/хв; P=600 Вт; 3 - d=3 мм; V=2,0 м/хв; P=900 Вт

Така значна втрата статичної міцності шліфпорошків КНБ при обробці лазерним випромінюванням з $\lambda = 1,06$ мкм, пояснюється високою поглинальною здатністю КНБ до даної довжини хвилі, що було визначено вище, а також відсутністю захисту зони лазерного впливу від окислювачів з навколишнього середовища. Як показали дослідження рис.7-9 при подачі в зону обробки захисного інертного газу аргону з витратою до 10 л/хв, кількість зруйнованих зерен різко зменшується. Відзначається, що застосування аргону сприяє підвищенню швидкості формування спечених валиків і поліпшенню їх якісних показників.

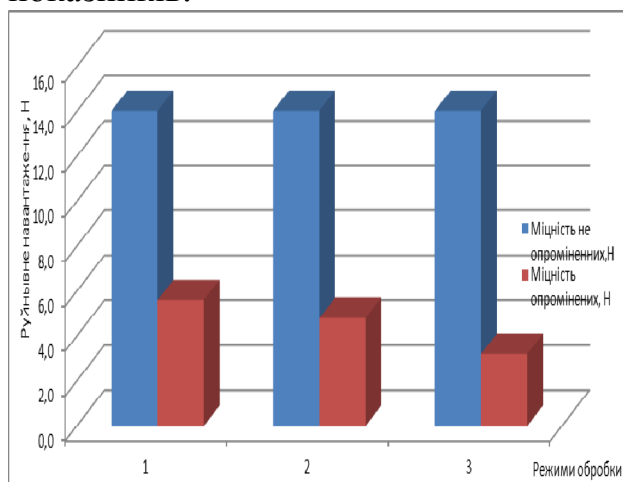


Рис.7. Діаграма розподілу статичної міцності шліфпорошків марки KB 250/200 при різних швидкостях переміщення й потужності лазерного випромінювання: довжина хвилі $\lambda = 1,06$ мкм; середовище – повітря, $d=3$ мм: 1 - $V=0,1$ м/хв, $P=300$ Вт; 2 - $V=1,0$ м/хв, $P=600$ Вт; 3 - $V=1,5$ м/хв, $P=900$ Вт

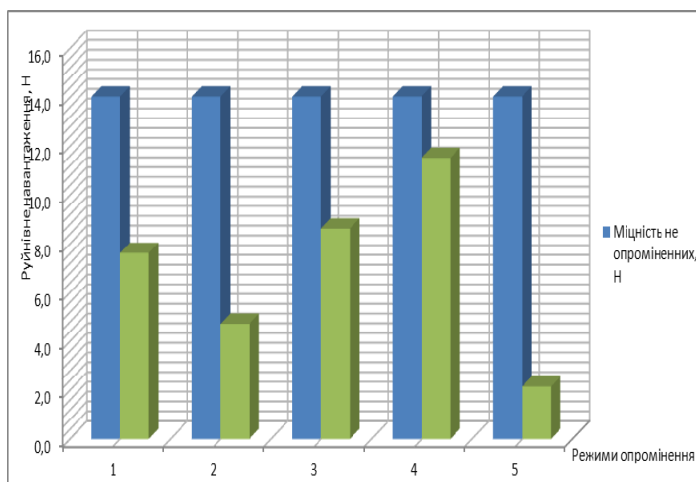


Рис.8. Діаграма розподілу статичної міцності шліфпорошків марки KB 250/200 при різних швидкостях переміщення й потужності лазерного випромінювання, при параметрах обробки: $\lambda = 1,06$ мкм; $d=3$ мм, середовище – $Ar=7$ л/хв: 1- $V=0,1$ м/хв, $P=300$ Вт; 2- $V=0,2$ м/хв, $P=300$ Вт; 3- $V=0,2$ м/хв, $P=500$ Вт; 4 - $V=0,4$ м/хв, $P=500$ Вт; 5- $V=1,0$ м/хв, $P=800$ Вт

Результати дослідження показали, що шліфпорошок марки KB 250/200 виробництва ІНМ ім. Бакуля навіть без застосування захисту мають задовільні показники міцності. Це відкриває перспективи ефективного його використання при формуванні інструментальних композитів методом лазерного селективного спікання.

Висновки

Таким чином, головним результатом виконаних досліджень впливу лазерного опромінювання на фізичний стан та властивості порошків КНБ можна вважати: визначенні оптимальні енергетичні параметри лазерного

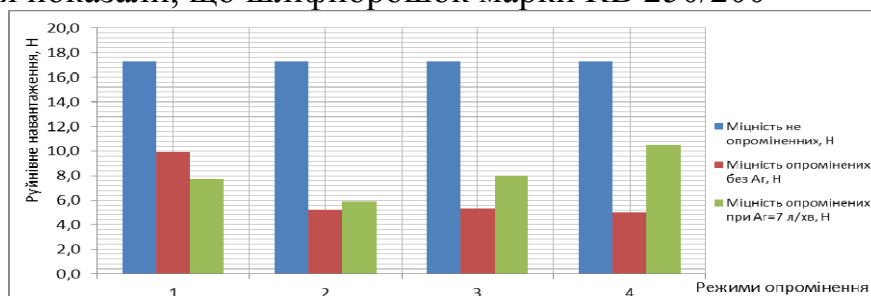


Рис.9. Діаграма розподілу статичної міцності шліфпорошків марки КР 315/250 додатково металізованих нікелем (60% від ваги зерна) при різних швидкостях переміщення і потужності лазерного випромінювання та наявності захисного середовища, при обробці з $\lambda = 1,06$ мкм $d=3$ мм: 1 - $V=0,1$ м/хв, $P=300$ Вт; 2 - $V=0,2$ м/хв, $P=500$ Вт; 3 - $V=0,4$ м/хв, $P=500$ Вт; 4 - $V=0,6$ м/хв, $P=600$ Вт

опромінювання порошків КНБ (густина потужності $W_p=(0,1\dots1,8)*10^4$ Вт/см², час дії 0,2–0,3 с, в залежності від величини шару, що спікається), які забезпечують температурний інтервал їх нагрівання в межах 800–1400°C, яке не чинить негативного термічного руйнівного впливу. При формування інструментальних шарів доцільно використовувати подачу в зону плавлення захисного інертного газу (аргону, азоту) при витраті 5-14 л/хв. Збільшення витрат приводить до нестабільності геометрії отриманого шару. Для спікання доцільно використовувати шліфпорошки зерен КНБ із захисним покриттям, що забезпечує в сумі із захисним газом, підвищену термостійкість і збереження абразивних властивостей.

Запропонований і досліджений спосіб дозволяє з принципово високою продуктивністю і низькою собівартістю формувати кубонітовмісні композити інструментального призначення для різноманітної номенклатури інструментів з точки зору форми, геометричних розмірів та властивостей зв'язок, до того ж він створює передумови для лазерного селективного сортування та лазерного модифікування порошків КНБ.

Список літератури: 1. А.М. Блощаневич, А.М. Бочко и др. Лазерная резка материалов на основе алмаза и плотных модификаций нитрида бора. – Порошковая металлургия. – 2004. – №3/4 – С.47-53. 2. В.В. Скороход. Спекание порошковых материалов при электротермическом, плазменном и лазерном нагреве. – 1998. – С. 228-248. 3. Райченко А.И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока. -М.: Металлургия, - 1984. – С.128. 4. Н.К. Толочко, Ю.В. Хлорков и др. Измерение поглощательной способности свободно насыпанных одно компонентных металлических порошков и ее изменение в процессе лазерной обработки. - Порошковая металлургия. -1997. - № 7/8. -С. 89-94. 5. Рагуля А.В. Селективное лазерное спекание. 1.Принципы. Континуальная модель. - Там же. - 1998. 6. Коваленко В.С., Головка Л.Ф., Черненко В.С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера. - К.: Техника. - 1991. – С.128. 7. Головка Л.Ф., Лук'яненко С.О. Монографія. Лазерні технології та комп'ютерне моделювання. – К.:Вістка, 2009. – 295С. 8. Головка Л.Ф., Гончарук О.О., Кагляк О.Д. Влияние лазерного нагрева на прочность кубического нитрида бора при статическом нагружении. – Восточно-европейский Журнал передовых технологий – 2010. – №1/6(43) – с. 4-10. 9. Патент на корисну модель №63067 Спосіб виготовлення надтвердих абразивів з покриттям 26.09.2011.

Поступила в редколлегию 11.06.2012

УДК 621.941

Л.Д. МЕЛКОНОВ, канд. техн. наук, доц., Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, Луганск

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНЬЯ ОТ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ И УГЛА СКРЕЩИВАНИЯ ПРИ ЧИСТОВОМ ТОЧЕНИИ ВАЛОВ ЧАШЕЧНЫМИ ПРИНУДИТЕЛЬНО ВРАЩАЮЩИМИСЯ РЕЗЦАМИ

Підібрано найбільш прийнятний метод визначення температури в зоні різання. Це метод термопар. Встановлено залежність зміни температури в зоні різання від режимів різання і кута схрещування інструменту і заготовки. Наведені протоколи залежностей, за якими побудовані графіки. Приведено оптимальне значення режимів різання і кута схрещування.

Ключові слова: чашковий примусово обертається різці; метод термопар, режими різання, кут скрещування, температура в зоні різання.

Подобран наиболее приемлемый метод определения температуры в зоне резания. Это метод термопар. Установлена зависимость изменения температуры в зоне резания от режимов резания и угла скрещивания инструмента и заготовки. Приведенные протоколы зависимостей, по которым построены графики. Приведено оптимальное значение режимов резания и угла скрещивания.

Ключевые слова: чашечный принудительно вращающийся резцы; метод термопар; режимы резания; угол скрещивания; температура в зоне резания.

Selected the most appropriate method for determining the temperature in the cutting zone. This method of thermocouple. The dependence of temperature in the cutting zone of the cutting tool and the angle of crossing and the workpiece. These protocols are dependencies on which the graphs. We give an optimal value of the cutting angle and the crossing.

Keywords: cup forcibly rotating blades, the method of thermocouples, cutting conditions, the angle of crossing, the temperature in the cutting zone.

1. Введение

В процессе обработки рабочих поверхностей винтовых валковых калибров чашечными принудительно вращающимися резцами в зоне резания возникают значительные силы резания, а также трения по передней и задней поверхностям инструмента приводят к пластическому деформированию обработанной поверхности. Вследствие перечисленного выше в зоне резания возникает температура. Величина температуры оказывает существенное влияние на процесс обработки: стойкость инструмента; качество поверхностного слоя; геометрические параметры готовой детали.

Целью данной работы является определение величины возникающей температуры в зоне резания.

2. Основное содержание работы

С нашей точки зрения наиболее приемлимым методом для исследования температуры в зоне резания является экспериментальные методы.

Основным объектом исследования будет температура возникающая в зоне резания и изменения ее величины, в зависимости от режимов обработки и угла между осями заготовки и инструмента (угла скрещивания).

Из всех существующих методов по определению температуры в зоне резания с нашей точки зрения наиболее приемлимым является – метод естественно образующейся термопары.

Однако измерить температуру в зоне резания при точении заготовок принудительно вращающимся резцом довольно проблематично. Это обуславливается постоянным вращением инструмента и как следствие обновления в зоне резания режущей кромки. Иными словами процесс обработки разделен на два участка :

1 – непосредственно рабочая зона;

2 – ветвь инструмента с «холостым» пробегом.

Этим и обуславливается трудность замера температуры резания в зоне резания.

Однако выбранный нами метод измерения температуры наиболее точен, т.к. измерения идет через ЭДС, а она возникает непосредственно в зоне контакта.

Сущность данного метода заключается в следующем: в процессе резания в контактной зоне заготовка – инструмент происходит соприкосновение передней поверхности инструмента со стружкой, а задней поверхности обработанной поверхностью в результате чего естественным путем создаются термопары. Electroдами для термопар является материал обрабатываемой заготовки и материал режущей кромки инструмента. Включая деталь и инструмент в замкнутую цепь, способствуем возникновению ЭДС, величина которой практически соответствует температуре в зоне резания.

Для преобразования показаний милливольтметра в градусы Цельсия термопара подвергается специальной тарировке.

Схема измерения температуры при точении методом естественно образующейся термопары изображена на рис. 1.

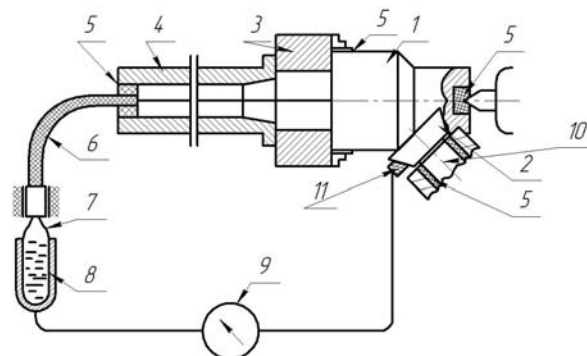


Рис. 1. Схема измерения температуры резания естественно образующейся термопарой

Обрабатываемая болванка 1 изолирована от патрона 3 и центра задней бабки эбонитовыми прокладками 5. Чашечный резец 2 из быстрорежущей стали или твердого сплава изолирован от резцедержателя эбонитовой втулкой 5. Резец делают цельным для того, чтобы в месте приваривания или припаивания режущей пластинки к корпусу резца не образовались паразитные термопары. Болванка медным проводником соединена с гибким валом 6, закрепленным в эбонитовой втулке, установленной на конце шпинделя станка 4. Контактный наконечник 7 гибкого вала опущен в ванночку со ртутью 8. Милливольтметр 9 одной клеммой соединен с торцом резка, а вторым — с ртутным токосъемником. Замкнутая электрическая цепь состоит из болванки – проводника – гибкого вала — токосъемника – милливольтметра – резка – болванки. Болванку изолируют от станка для устранения влияния паразитных термопар, могущих возникнуть между отдельными деталями станка. Однако роль паразитных термопар при высокой температуре контактных поверхностей инструмента незначительна, и за счет некоторого снижения точности измерения установку можно упростить, отказавшись от изоляции болванки, сохранив изоляцию только инструмента.

Изоляция чашечного принудительно вращающегося инструмента несколько затруднена, вследствие необходимости изолировать от станка не всю установку, а именно чашечный резец. Это обусловлено тем, что в приводном механизме чашечного резца много сопрягаемых поверхностей, в точках контакта которых возникают различные термоэлектродвижущие силы. Причем эти силы различны и постоянно изменяющиеся. Поэтому изолируют всю приводную систему резца от станка, а чашечный резец изолируют от привода на его шпинделе 10. ЭДС чашечного резца снимают с помощью подвижного контакта. В качестве подвижного контакта использовался медно-графитовый материал 11.

Проведенными лабораторными исследованиями установлено, что температура резания в значительной степени зависит от режимов резания и угла скрещивания осей обрабатываемой заготовки и чашечного инструмента. В результате проведенных лабораторных исследований получены экспериментальные данные. Результаты полученных экспериментальных занесены в таблицы 1-4. По этим данным построим кривые зависимости температуры в зоне резания от режимов резания и угла скрещивания осей заготовки и инструмента.

Таблица 1 - Зависимость температуры резания от угла скрещивания при $V = 8\text{ м/с}$, $S = 0,38\text{ мм/об}$, $t = 0,4\text{ мм}$

Угол скрещивания γ_c	Температура в град.
105	460
110	440
115	400
120	380
125	370
130	340
135	320
140	300
145	290
150	260
155	250

Таблица 3 - Зависимость температуры резания от подачи при $V = 8\text{ м/с}$; $\gamma_c = 140^\circ$; $t = 0,4\text{ мм}$

Подача S	Температура в град.
0,2	260
0,4	270
0,5	290
0,6	320
0,7	340
0,9	340
1,2	360

Таблица 2 - Зависимость температуры резания от скорости резания при $\gamma_c = 140^\circ$; $S = 0,38\text{ мм/об}$; $t = 0,4\text{ мм}$

Скорость резания V	Температура в град.
3,0	275
4,5	320
6	350
7,5	380
9	400
10,5	450
12	475

Таблица 4 - Зависимость температуры резания от глубины резания при $V = 8\text{ м/с}$, $S = 0,38\text{ мм/об}$, $\gamma_c = 140^\circ$

Глубина резания t	Температура в град.
0,2	280
0,4	310
0,6	340
0,8	360
1	360
1,2	400
1,4	420

Анализ графиков (рис.2) показывает, что температура резания уменьшается при увеличении угла скрещивания $\gamma_c = 105^\circ \dots 130^\circ$, а при увеличении γ_c до 160° остается примерно на одном уровне. С увеличением скорости резания V 3,5...12 м/с уменьшается пластическая деформация, а следовательно, и уменьшается температура, образующаяся в зоне резания.

С увеличением глубины резания $t = 0,2 \dots 1,5\text{ мм}$ увеличивается длина лезвия, что улучшает теплоотвод и снижает температуру резания.

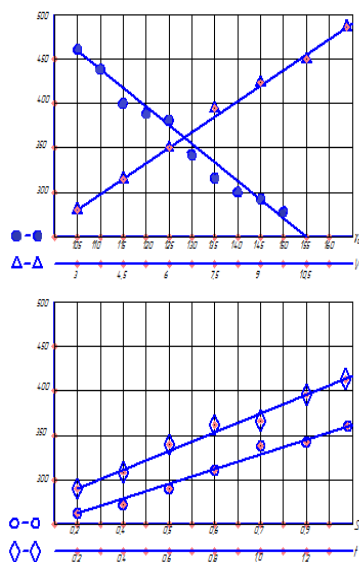


Рис. 2. Зависимость температуры резания от угла скрещивания γ_c , скорости резания V , подачи S и глубины резания t

$$Q = C \cdot V^{0,20} \cdot S^{0,14} \cdot t^{0,2} \cdot \gamma^{-0,09} \quad (1)$$

где C - коэффициент, учитывающий влияние свойств обрабатываемого материала на температуру резания.

Проведенные экспериментальные исследования, построенные по ним графики (рис.2), и выведенная формула (1) позволяют сделать следующие выводы и рекомендовать оптимальные режимы резания и угол скрещивания.

Выводы

1. При изменении угла скрещивания осей заготовки валкового калибра и принудительно вращающегося чашечного резца температура изменяется следующим образом: с увеличением угла скрещивания от $\gamma_c = 105^\circ \dots 135^\circ$ происходит снижение температуры от 500°C до 300°C . Дальнейшее увеличение угла скрещивания γ_c на величину температуры оказывает не значительное влияние.

2. Увеличение скорости резания от $V = 3 \text{ м/сек}$ до 12 м/сек приводит к резкому увеличению температуры в зоне резания от 250°C до 500°C .

3. Анализ графиков зависимости температуры в зоне резания от увеличения подачи в пределах $0,2-1,4 \text{ мм/об.}$ и увеличения глубины резания температура в зоне резания плавно возрастает.

4. Отсюда можно сделать заключение, что наиболее оптимальная температура в зоне резания будет при угле скрещивания $\gamma_c = 135^\circ-140^\circ$; скорости резания $V = 4,5-6 \text{ м/сек}$; подачи $S = 0,6-0,7 \text{ мм/об.}$ и глубине резания $t = 0,8-1 \text{ мм}$.

Список литературы: 1. Мелконов Л.Д. Технологическое обеспечение качества и точности обработки валов принудительно вращающимися резцами. - Дис... канд. техн. наук. - Москва, 1985г. - 188с. 2. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов М.: Машиностроение, 1975, - 345с. 3. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. - М.: Машиностроение. 1976-200с.

Поступила в редколлегию 11.06.2012

УДК 621.3.089

В.В. БАРЧАН, асис., ХНАДУ, Харків

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ДИНАМІЧНОСТІ МОСТОВИХ СПОРУД

У роботі синтезована оптимальна система вимірювань коефіцієнта динамічності мостових споруд. В основі оптимальної системи лежить методика комплексування вимірювачів, робота яких ґрунтується на різних фізичних принципах. Підвищення точності вимірювань коефіцієнта динамічності мостових споруд досягається за рахунок підвищення точності вимірювання динамічного прогину.

Ключові слова: синтез, оптимальна система, вимірювач, споруди мостові, коефіцієнт динамічності, комплексування вимірювачів.

В работе синтезирована оптимальная система измерений коэффициента динамичности мостовых сооружений. В основе оптимальной системы лежит методика комплексирования измерителей, построенных на различных физических принципах. Повышение точности измерений коэффициента динамичности мостовых сооружений достигается за счет более точного измерения динамических прогибов.

Ключевые слова: синтез, оптимальная система, сооружения мостовые, коэффициент динамичности, комплексирование измерителей.

An optimal system for dynamic amplification factor measuring has been presented in the paper. The techniques are based on complexing of devices which operate according different physical principles. The accuracy of measurements of the dynamic amplification factor for bridge structures is achieved at the expense of more accurate measuring of the dynamic deflections.

Keywords: accuracy, bridge constructions, sensor, complexing, near optimal system, dynamic amplification factor.

Вступ

Мостові споруди (МС) є незмінним структурним елементом системи транспортних сполучень будь-якої розвиненої держави світу. Належний технічний стан МС є запорукою безпечного пересування пасажирів, вантажів та стабільного економічного розвитку. Під час експлуатації мостові споруди перебувають під впливами та навантаженнями різного походження. Це обумовлено тим, що відбувається постійне зростання інтенсивності руху транспортних засобів та збільшення їх вантажності, що призводить до передчасного старіння вузлів та елементів споруд. Оцінка впливу рухомого транспортного засобу на споруду є складним науково-технічним завданням, оскільки система «МС – транспортний засіб» перебувають у нелінійній взаємодії і результати випробувань з визначення впливу транспортного потоку складно піддаються аналізу. Для контролю МС та перевірки здатності витримувати навантаження введено поняття коефіцієнт динамічності (КД) [1]. Цей параметр є інтегральною характеристикою, яка визначається із відношення динамічного до статичного прогинів плити або головних балок споруди [1, 3]. Від точності

вимірювань цих параметрів залежить якість діагностики та безпека подальшої експлуатації мосту. Таким чином, необхідним є підвищення точності вимірювань статичних та динамічних прогинів. Для вимірювання прогину (лінійних переміщень) існує велика кількість вимірювачів, зокрема цифровий прогиномір з механічним чутливим елементом та похибкою вимірювань 0,001 мм. Як правило, вимірювачі лінійних переміщень є інерційними і мають обмежену смугу пропускання цифрових індикаторів. При вимірюванні динамічних прогинів, вихідний сигнал датчика, що встановлений на МС, часто спотворюється. Отже, для проведення вимірювань потрібно використовувати малоінерційні датчики, до яких, зокрема, належать неконтактні датчики радіолокаційного типу, наприклад, лазерні далекоміри. На жаль, вони мають високу вартість і до того ж обмежену сферу застосування в МС, оскільки складна геометрія споруди, особливі вимоги до розташування датчиків, стан оптичного середовища ускладнюють їх не використання.

Оскільки завади механічного характеру впливають на роботу механічних датчиків і не будуть впливати на лазерний віброметр, і навпаки, завади, що характерні для оптичного діапазону електромагнітних хвиль не впливатимуть на функціонування механічних датчиків. Таким чином, створюється вимірювальна система, яка є практично незалежною від завад, оскільки одночасна дія механічних і оптичних завад маловірогідне. Для підвищення точності вимірювань коефіцієнта динамічності можна скористатись відомим [2] методом комплексування вимірювачів, робота яких ґрунтується на різних фізичних принципах.

Аналіз публікацій

Підвищення точності вимірювань лінійних переміщень при проведенні динамічних випробувань МС є актуальним науково-технічним завданням [2], оскільки від коректності отриманих результатів вимірювань залежить якість діагностики МС і, як наслідок, безпечність та продуктивність їх експлуатації. Основні методи підвищення точності вимірювань приведені в [3], де на початковому етапі розв'язання задачі підвищення точності вимірювань аналізують вимірювальної інформації та визначають цілі її застосування. Після цього визначаються основні джерела похибок. Подальший аналіз вимірювальної інформації проводиться за домінуючими складовими похибок і розглядаються основні способи їх корекції. При визначенні КД обрання методики та засобів вимірювань є дуже важливим завданням. Для їх вимірювань існує велика кількість методів та засобів [4...6]. Важливим етапом діагностики є обрання засобів вимірювань, у даному випадку для оцінки динамічних прогинів прийнято використовувати цифрові індикатори лінійних переміщень, які мають цифровий інтерфейс передачі даних. Значна протяжність ліній зв'язку, атмосферні фактори, зокрема, термальний вплив, опади можуть виступати додатковим джерелом завад (матеріальних витрат).

Оскільки під час експлуатації МС перебувають під впливом транспортних потоків випадкового складу, в елементах конструкції, зокрема прогонових будовах, можуть виникати імпульсні коливання досить високої амплітуди. Такі

впливи порушують запроектовані режими експлуатації МС та призводять до зміни характеру коливань [5].

Основна частина

Нехай корисним повідомленням, що знімається з датчика, є лінійне переміщення – прогин споруди. Запишемо апріорне повідомлення прогину плити МС у вигляді стохастичного диференціального рівняння, яке описує марковський процес [2]:

$$\frac{d\ell(t)}{dt} = -\alpha_0 \cdot \ell(t) + n_{01}, \quad (1)$$

де α_0 – ширина спектра прогину МС, $\ell(t)$ – прогин головної балки МС у вертикальній площині, n_{01} – незалежний гауссівський білий шум, що має двохсторонню спектральну щільність $N_{0D} / 2$.

Аналогічне апріорне повідомлення для радіолокаційного вимірювача представимо у вигляді двох рівнянь в квадратурах:

$$\frac{dS_1(t)}{dt} = -\alpha \cdot S_1(t) + n_{02}, \quad (2)$$

$$\frac{dS_2(t)}{dt} = -\alpha \cdot S_2(t) + n_{03}. \quad (3)$$

де α – ширина спектра повідомлення для радіолокаційного вимірювача, $S_1(t)$, $S_2(t)$ – квадратурні компоненти радіолокаційного сигналу, що несуть інформацію про прогин,

n_{02} , n_{03} – незалежні гауссівські білі шуми радіолокаційного вимірювача, що мають двохсторонню спектральну щільність $N_0 / 2$.

Процеси $S_1(t)$, $S_2(t)$ є вузькосмужними нормальними процесами. Обвідну цього процесу та фазу обчислюють за відомими формулами радіотехніки:

$$A(t) = \sqrt{S_1^2(t) + S_2^2(t)},$$

$$\varphi(t) = \arctg \frac{S_2(t)}{S_1(t)}. \quad (4)$$

Переміщення вузла $\ell(t)$ пов'язано з фазою $\varphi(t)$ простою залежністю:

$$\ell(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi(t). \quad (5)$$

В формулі (5) замість коефіцієнта $\lambda / 2\pi$ записаний коефіцієнт $\lambda / 4\pi$. Цим враховується той факт, що датчик забезпечує користувачів інформацією про переміщення точки $\ell(t)$, радіолокаційний датчик - про подвійне переміщення цієї точки для датчика.

На вході індикатора лінійних переміщень діє випадковий процес

$$\eta(t) = \ell(t) + n_D(t), \quad (6)$$

а на вході радіолокаційного вимірювача аналогічний процес представимо у вигляді:

$$\xi_1(t) = S_1(t) \cdot \cos \omega_0 t + n(t), \quad (7)$$

$$\xi_2(t) = S_2(t) \cdot \cos \omega_0 t + n(t), \quad (8)$$

де $\omega_0(t)$ – несуча частота коливань радіолокаційного сигналу,

$n_d(t), n(t)$ - шуми датчика та радіолокаційного вимірювача відповідно.

Для простоти в смузі пропускання обох вимірювачів ці шуми вважаємо білими з спектральною щільністю відповідно N_d та N .

Система лінійної фільтрації, яка є оптимальною за критерієм мінімуму дисперсії похибки, описується наступними рівняннями [2]

$$\frac{d\bar{\mu}}{dt} = A\bar{\mu} + RH^T N^{-1} (\bar{\zeta} - H\bar{\mu}), \quad (9)$$

$$\frac{dR}{dt} = AR + RA^T - RH^T N^{-1} HR + N_0. \quad (10)$$

Матриця коефіцієнтів системи рівнянь (1), (2), (3):

$$A = \begin{pmatrix} -\alpha_0 & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Вектор параметрів вимірювальної системи

$$\bar{\mu} = \begin{pmatrix} \ell \\ S_1 \\ S_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ell(t) \\ S_1(t) \\ S_2(t) \end{pmatrix}. \quad (12)$$

$H(t)$ – матриця спостережень, яка має вигляд

$$H(t) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_0 t & 0 \\ 0 & 0 & \sin \omega_0 t \end{pmatrix}. \quad (13)$$

N_0 – симетрична матриця поділених навпіл спектральних інтенсивностей, запишемо наступним чином

$$N_0 = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} N_{0d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{N_0}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{N_0}{2} \end{pmatrix}. \quad (14)$$

$\bar{\zeta}$ – вектор-стовпець спостережень,

$$\bar{\zeta} = \begin{pmatrix} \eta(t) \\ \xi_1(t) \\ \xi_2(t) \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Матриця спектральних щільностей завад

$$N = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} N_d & 0 & 0 \\ 0 & \frac{N}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{N}{2} \end{pmatrix}. \quad (16)$$

де N_d – значення спектральної щільності повідомлення для індикатора,

N – значення спектральної щільності повідомлення радіолокаційного вимірювача,

R – кореляційна матриця похибок фільтрації, яка має вигляд:

$$R = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix}.$$

Для даної задачі з фізичних міркувань $R_{22} = R_{33}$, $R_{12} = R_{13} = R_{21} = R_{31}$. Тоді

$$R = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{12} \\ R_{12} & R_{22} & R_{23} \\ R_{13} & R_{23} & R_{33} \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Векторне рівняння (9) після підстановок перетворюється до трьох диференціальних рівнянь оцінок:

$$\frac{d\hat{\ell}(t)}{dt} = -\alpha_0 \hat{\ell} + \frac{2R_{11}}{N_d}(\eta - \hat{\ell}) + \frac{2R_{12}}{N} \cos w_0 t \cdot (\xi_1 - \hat{\xi}_1 \cdot \cos w_0 t) + \frac{2R_{13}}{N} \sin w_0 t \cdot (\xi_2 - \hat{\xi}_2 \sin w_0 t), \quad (18)$$

$$\frac{d\hat{\xi}_1(t)}{dt} = -\alpha \cdot \hat{\xi}_1 + \frac{2R_{12}}{N_d}(\eta - \hat{\ell}) + \frac{2R_{22}}{N} \cos w_0 t \cdot (\xi_1 - \hat{\xi}_1 \cos w_0 t) + \frac{2R_{23}}{N} \sin w_0 t \cdot (\xi_2 - \hat{\xi}_2 \sin w_0 t), \quad (19)$$

$$\frac{d\hat{\xi}_2(t)}{dt} = -\alpha \cdot \hat{\xi}_2 + \frac{2R_{13}}{N_g}(\eta - \hat{\ell}) + \frac{2R_{23}}{N} \cos w_0 t (\xi_1 - \hat{\xi}_1 \cos w_0 t) + \frac{2R_{33}}{N} \sin w_0 t \cdot (\xi_2 - \hat{\xi}_2 \sin w_0 t). \quad (20)$$

Система диференціальних рівнянь дисперсій :

$$\frac{dR_{11}}{dt} = -2\alpha_0 R_{11} - \frac{2R_{11}^2}{N_d} - \frac{2R_{12}^2}{N} \cos^2 w_0 t - \frac{2R_{13}^2}{N} \sin^2 w_0 t + \frac{1}{2} N_{0,d}, \quad (21)$$

$$\frac{dR_{12}}{dt} = -\alpha_0 R_{12} - \alpha R_{12} - \frac{2}{N_d} R_{11} R_{12} - \frac{2R_{12} R_{22}}{N} \cos^2 w_0 t - \frac{2R_{13} R_{23}}{N} \sin^2 w_0 t, \quad (22)$$

$$\frac{dR_{13}}{dt} = -\alpha_0 \cdot R_{13} - \alpha \cdot R_{13} - \frac{2R_{11} \cdot R_{13}}{N_d} - \frac{2R_{12} R_{23}}{N} \cos^2 w_0 t - \frac{2R_{13} R_{33}}{N} \sin^2 w_0 t, \quad (23)$$

$$\frac{dR_{22}}{dt} = -2\alpha R_{22} - \frac{2R_{12}^2}{N_d} - \frac{2R_{22}^2}{N} \cos^2 w_0 t - \frac{2R_{23}^2}{N} \sin^2 w_0 t + \frac{1}{2} N_0, \quad (24)$$

$$\frac{dR_{23}}{dt} = -2\alpha R_{23} - \frac{2R_{12} R_{13}}{N_d} - \frac{2R_{22} R_{23}}{N} \cos^2 w_0 t - \frac{2R_{23} R_{33}}{N} \sin^2 w_0 t, \quad (25)$$

$$\frac{dR_{33}}{dt} = -2\alpha R_{33} - \frac{2R_{13}^2}{N_d} - \frac{2R_{23}^2}{N} \cos^2 w_0 t - \frac{2R_{33}^2}{N} \sin^2 w_0 t + \frac{1}{2} N_0. \quad (26)$$

Попередні результати моделювання показують, що типові засоби вимірювань при застосуванні цифрового індикатору лінійних переміщень задовольняють вимогам точності вимірювань статичних прогинів. Використання запропонованого вимірювача для оцінки значень статичних прогинів

нерациональне. Тому оцінки (16...18) та дисперсії (21...26) промодельємо для динамічного прогину МС.

Скориставшись рівнянням (1), представимо для прикладу модель статичного (крива 2) та динамічного прогинів (крива 1) плити (несучих балок) МС при визначенні КД амплітудою $\ell_c = 1,1$ мм та $\ell_\phi = 1,32$ мм [8] (рис. 1). Розглянемо три характерних випадки функціонування

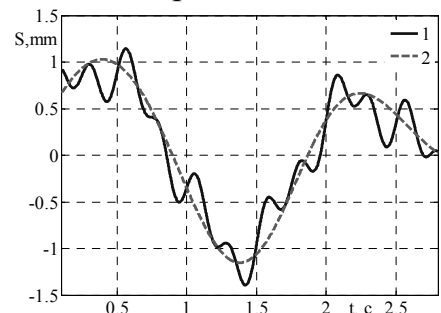


Рис. 1. Приклад реалізації динамічного (1) та статичного (2) прогинів плити МС

системи. Нехай у першому випадку сигнал повідомлення у суміші із завадами надходить на вхід вимірювача, коли працює тільки індикатор лінійних переміщень, коли радіотехнічний вимірювач не працює або на нього діють потужні електромагнітні завади.

В результаті моделюванні отримана часова залежність оцінки динамічного прогину (рис. 2, крива 3) та його дисперсії (рис. 3, крива 3), що набуває усталеного значення у момент часу $t=0,5$ с.

Можна зробити висновок, що система на основі тільки механічного датчика неякісно оцінює швидкі прогини плити МС згладжуючи при цьому флуктуації переміщення МС більш високої частоти. Якраз такі переміщення можуть визначати відмінність динамічного від статичного прогинів, шляхом коефіцієнта динамічності МС.

У другому випадку працює лише радіолокаційна система, механічний індикатор відключений або його використання неможливе по причині складності забезпечення реперних точок монтажу

Радіолокаційна система більш точно оцінює динамічний прогин (рис. 2, крива 2) та дисперсію його оцінки (рис. 3, крива 1), що набуває статичного значення на рівні $0,15 \text{ мм}^2$ за короткий проміжок часу.

Результати роботи оптимальної системи з оцінки динамічного прогину заданої форми та його дисперсії при сумісній роботі обох вимірювачів приведено на рис. 2 (крива 1) та рис. 3 (крива 2) відповідно. З цих рисунків випливає, що дисперсія вимірювання динамічного прогину МС зменшується порівняно з першими двома випадками в декілька разів.

Для визначення абсолютної похибки вимірювань коефіцієнта динамічності σ_{KD} скористаємося рівнянням:

$$\sigma_{KD} = K_d \cdot \left(\frac{\sigma_{d_{cm}}}{\ell_c} + \frac{\sigma_{d_{дин}}}{\ell_d} \right), \quad (27)$$

де K_d – вимірне значення коефіцієнту динамічності у даному випадку дорівнює 1,2; $\sigma_{d_{cm}}, \sigma_{d_{дин}}$ – абсолютні похибки (значення середньоквадратичної похибки) статичного та динамічного прогинів, відповідно, причому $\sigma_{d_{cm}} \ll \sigma_{d_{дин}}$,

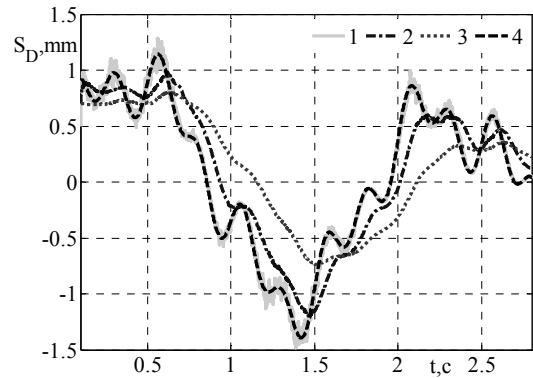


Рис. 2. Результати моделювання оцінок реалізації сигналу динамічного прогину з часом

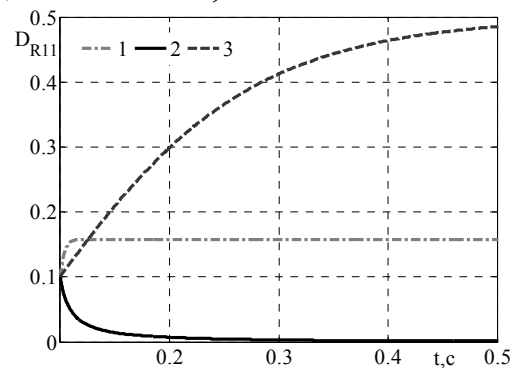


Рис. 3. Часова залежність зміни дисперсії R_{11} оцінки $f(t)$ при вимірюванні тільки радіолокаційною системою (крива 1), тільки цифровим індикатором (крива 3) та при використанні оптимальної системи (крива 2)

(при розрахунку складову $\frac{\sigma_{d_{cm}}}{\ell_c}$ не враховуємо).

Після простих обчислень параметр σ_{KD} набуває значення $\sigma_{KD} = 0,63$ мм при використанні тільки індикатора лінійних переміщень; $\sigma_{KD} = 0,13$ мм при використанні тільки радіотехнічної системи і $\sigma_{KD} = 0,055$ мм для синтезованої оптимальної схеми, таким чином створена система істотно підвищує точність вимірювання.

Висновки

Синтезована в роботі оптимальна система за критерієм мінімуму дисперсії дозволяє підвищити точність вимірювання коефіцієнта динамічності на 42 % порівняно з кращим результатом вимірювань одним вимірювачем. Отриманий результат досягається за рахунок підвищення точності оцінки динамічного прогину. Таким чином, застосування синтезованої системи не обмежується її використанням для вимірювань коефіцієнта динамічності і може бути використаною при дослідженні динамічних характеристик МС.

Список літератури: 1. Гибшман, Е. Е. Методы динамических испытаний мостов: вопросы испытания и освидетельствования мостов / Е. Е. Гибшман [Электронный ресурс] – М. : Транспорт, 1941. – 195 с. 2. Тихонов, В. И. Оптимальный прием сигналов / В. И. Тихонов [Текст] – М. : Радио и связь, 1983. – 320 с. 3. Архипенко, Ю. В. Методика расчета динамического воздействия подвижных нагрузок с мостами с применением программных комплексов конечно-элементного анализа [Электронный ресурс] : дис. ... канд. техн. наук / Ю. В. Архипенко. – М., 2006. – 176 с. 4. Редченко, В. П. Динамічний коефіцієнт автодорожніх мостів: проблеми натурного визначення // Дороги та мости / В. П. Редченко [Електронний ресурс] : 36. наук. ст. – Вип. 6. – К. : ДерждорНДІ, 2006. – С. 122–133. 5. Редченко В. П. Визначення структурних параметрів прогонових будов мостів за результатами їх випробувань рухомим навантаженням / В. П. Редченко [Електронний ресурс] // Автошляховик України. – 2009. – № 4. – С. 43–46. 6. EVACES'09. Experimental vibration analysis for civil engineering structures : Proceedings of the international conference. – Wroclaw, Poland, 2009. – 208 p. 7. ДБН В.2.3-6:2009 Мости та труби. Обстеження та випробування. – Введ. 2010-03-01 – К. Міненергобуд України, 2009. – 62 с. 8. Сергеев, А. А. Методика экспериментальной оценки динамических воздействий подвижной нагрузки на пролетные строения автодорожных мостов [Электронный ресурс] : дис. канд. техн. наук / А. А. Сергеев. – М., 2007. – 197 с.

Поступила в редколлегию 11.06.2012

УДК 004.832.38

М.В. ВОЛЧЕНКО, ассис, Институт информатики и искусственного интеллекта «Донецкий национальный технический университет»

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА РЕЗОЛЮЦИИ В ЛОГИКЕ ВЫСКАЗЫВАНИЙ ПРИ ПОМОЩИ 0,1-НОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДИЗЬЮНКТОВ

Роботу присвячено вирішенню задачі перевірки виконуваності формул логіки висловлювань, що характеризуються великою потужністю. Запропоновано 0,1-не представлення диз'юнктив і матрична структура представлення зв'язків диз'юнктив, для яких розроблено алгоритм резолюції з евристичної функцією вибору зв'язку для резольвування. Наведено результати експериментальних досліджень, що підтверджують ефективність запропонованого алгоритму.

Ключові слова: перевірка виконуваності, логіка висловлювань, диз'юнкт, алгоритм резолюції.

Работа посвящена решению задачи проверки выполнимости формул логики высказываний, характеризующихся большой мощностью. Предложено 0,1-ное представление дизъюнктов и матричная структура представления связей дизъюнктов, для которых разработан алгоритм резолюции с эвристической функцией выбора связи для резольвирования. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие эффективность предложенного алгоритма.

Ключевые слова: проверка выполнимости, логика высказываний, дизъюнкт, алгоритм резолюции.

The work is devoted to solving the problem of testing the satisfiability of propositional logic formulas, that characterized by a great power. The clauses 0,1-representation and matrix representation of the clauses links structure are proposed. A resolution algorithm with an heuristic function of the links choice for resolution is proposed. The experimental results confirming the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: satisfiability solving, propositional logic, clause, resolution algorithm.

1. Введение

Булева алгебра находит свое применение во многих направлениях информатики и проектирования цифровых систем. Многие задачи в проектировании и тестировании, искусственном интеллекте и комбинаторике могут быть представлены как последовательность операций на булевых формулах. Такие приложения требуют эффективных алгоритмов представления и обработки булевых функций. Одними из наиболее важных и сложных задач данной области являются задачи проверки выполнимости формулы, когда необходимо доказать, что данное логическое выражение принимает истинное значение при любых наборах входных данных, и проверки эквивалентности двух формул, т.е. доказательство того, что логические выражения обозначают одну и ту же функцию. Такие задачи являются NP-полными, следовательно, число машинного времени, необходимое для выполнения таких операций, экспоненциально возрастает с увеличением объема входных данных. В худшем случае, все известные подходы имеют такую же вычислительную сложность, как и простейшее вычисление с помощью таблиц истинности. На практике зачастую удается избежать экспоненциальных вычислений за счет применения различных эвристических приемов [1].

Для эффективной обработки множеств дизъюнктов большой мощности процедура вывода должна отвечать следующим требованиям [2]: на сколько это возможно, сужать пространство поиска контрарной пары на каждом шаге резольвирования; исключать из дальнейшего рассмотрения дизъюнкты, которые не могут быть использованы в процессе доказательства; в процедуре вывода должен быть реализован эффективный алгоритм выбора контрарных пар для резольвирования.

Процедура вывода на графе связей удовлетворяет всем представленным выше принципам создания эффективных процедур дедуктивного вывода. Граф связей является как способом представления множества дизъюнктов логики высказываний и логики предикатов первого порядка, так и основой для построения алгоритмов последовательной и параллельной резолюции [3].

Целью данной работы является разработка эффективного представления дизъюнктов и соответствующей им КНФ, а также построение оптимизированного алгоритма резолюции для разработанного представления.

2. Постановка задачи

Рассматривается классическая задача проверки выполнимости логических высказываний. Исходными данными является множество дизъюнктов $S = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$. Необходимо проверить выводим ли из множества дизъюнктов S заданного высказывания пустой дизъюнкт $\square$. Если это так, то S невыполнимо, иначе – выполнимо [2].

Данная задача является NP-полной за счет экспоненциального роста пространства поиска.

3. Вывод на графе связей

Особенностью современных программных комплексов является большой объем входных данных. В системах логического вывода возникает необходимость обработки КНФ, которые могут содержать более миллиона дизъюнктов, состоящих из сотен литералов

Одним из основных методов повышения эффективности процесса вывода является резольвирование на графе связей [2]. При построении графа связей для последовательности дизъюнктов $S = C_1, C_2, \dots, C_k$, состоящих из конъюнктов $K_1, K_2, \dots, K_m$, каждому дизъюнкту ставится в соответствие вершина графа G . Две вершины соединяются ребром, называемым связью, если они образуют контрарную пару, т.е. по этим дизъюнктам может быть проведено резольвирование. Результат резольвирования узлов добавляется в граф G .

4. Представление дизъюнктов и их связей

Пусть задано множество дизъюнктов S . Пусть $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ – алфавит всех букв из S . Считаем, что A линейно упорядочен.

На начальном этапе каждый дизъюнкт будем представлять 0,1-ным набором $X_j = (X_{j1}, \dots, X_{jn})$ по правилу [6]:

$$X_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{если } a_i \text{ входит в } C_j \text{ без отрицания} \\ 0, & \text{если } a_i \text{ входит в } C_j \text{ с отрицанием} \\ _ , & \text{если литерал } \tilde{a}_i \text{ не входит в } C_j \end{cases}$$

В результате такого представления будет получено множество 0,1-ных векторов (наборов), соответствующее исходному множеству S .

Полученные наборы x_j необходимо упорядочить таким образом, чтобы упростить поиск связей для резольвирования, а также избежать роста пространства поиска при добавлении резольвенты. В настоящей работе предлагается разбить наборы x_j на n классов, содержащих соответствующее номеру класса число ‘_’, что соответствует длине дизъюнктов множества S . Такие классы необходимо упорядочить по убыванию числа ‘_’ в наборах (возрастанию длины дизъюнктов множества S). Внутри каждого из классов также необходимо упорядочить наборы x_j по возрастанию номера позиции ‘_’.

Каждой паре наборов x_i и x_j из списка дизъюнктов, ставится в соответствие связь $R(i,j)$ по правилу:

$$R_m(l, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } (X_{lm} = X_{jm}) \text{ и } (X_{lm} \neq '_') \\ 0, & \text{если } X_{lm} \oplus X_{jm} = 1 \\ -, & \text{если } (X_{lm} = '_') \text{ или } (X_{jm} = '_') \end{cases}.$$

Далее по построенной матрице R выполняется процедура резольвирования по следующему алгоритму.

5. Описание алгоритма резолюции на матрице связей

Предлагаемый алгоритм состоит из следующих процедур: предобработка матрицы связей, выбор связи для резольвирования, резольвирование дизъюнктов, добавление полученного вектора-резольвенты в матрицу связей.

5.1 Оптимизация матрицы связей

Обработка матрицы осуществляется построчно, начиная с первой строки. Выполняется удаление дизъюнктов-тавтологий, поглощенных и чистых дизъюнктов для всех связей матрицы R.

1) В матрице связей, если для наборов x_i и x_j количество нулей в связи $R(l, j)$ больше одного, то в результате резольвирования соответствующей пары дизъюнктов будет получен дизъюнкт-тавтология, и такую связь необходимо удалить.

2) Если $\forall i: i \in (\overline{1, n}) (R_i(l, j) = R_i(j, j)) \cup (R_i(l, j) = '_')$, то дизъюнкт x_i поглощает дизъюнкт x_j , удаляются j-е строка и столбец.

3) Если в текущей строке j отсутствуют связи для резольвирования, то получен чистый дизъюнкт и эта строка удаляется.

Обработка матрицы связей продолжается до тех пор, пока не будут рассмотрены все строки.

Так как поглощающие дизъюнкты имеют меньшую длину, чем поглощаемые, то упорядочивание наборов по числу $'_'$ позволяет выполнить процедуру поглощения за меньшее число шагов.

5.2 Выбор связи для резольвирования

Для получения резольвенты минимальной длины в [6] предложена эвристика выбора связи для резольвирования: выбирается связь, число $'_'$ которой минимально отличается от числа $'_'$ второго дизъюнкта и число единиц максимально. В большинстве случаев такой подход позволяет избежать резкого роста числа обрабатываемых дизъюнктов.

Благодаря способу упорядочивания наборов и построения матрицы связей, предложенных в данной работе, выбор связи с помощью такой эвристики сводится к последовательному выбору связей для резольвирования, что значительно уменьшает число, выполняемых сравнений.

В результате исследований, проведенных на ряде тестовых примеров, было показано, что такое упорядочивание наборов позволяет, анализируя матрицу связей, определять пары наборов, резольвирование которых приведет к поглощению этих наборов. Если $\forall i: i \in (\overline{1, n}) (R_i(l, j) = R_i(j, j)) \cup (R_i(l, j) \oplus R_i(j, j) = 1)$, то наборы x_j и x_i будут удалены.

Так как выбор таких связей приводит к сокращению пространства поиска, предлагается использовать такое свойство на этапе оптимизации матрицы связей, а также при добавлении резольвенты в матрицу связей. Следует отметить, что

такую проверку следует проводить для наборов одного класса, содержащих одинаковое число ' _ ', таким образом, использование такой эвристики существенно не повышает вычислительную сложность алгоритма.

5.3 Операция резольвирования дизъюнктов

Наличие в 0,1-ном наборе связи одного нуля показывает, что дизъюнкты образуют контрарную пару, то есть возможно их резольвирование. Операция резольвирования заключается в получении из векторов X_i и X_j нового вектора – резольвенты T_k , который определяется по правилу:

$$T_k = \begin{cases} X_{jk}, & \text{если } (X_{lk} \neq X_{jk}) \text{ и } (X_{lk} = ' _ ') \\ _ , & \text{если } (X_{lk} \neq X_{jk}) \text{ и } (X_{lk} \neq ' _ ') \\ X_{lk}, & \text{иначе} \end{cases} ,$$

Полученные резольвенты добавляются в соответствующий класс наборов, не нарушая упорядоченности внутри этого класса, что позволит уменьшить количество сравнений при поиске новой связи для резольвирования, а также увеличить вероятность поглощения новым дизъюнктом предыдущих.

Если номер класса нового набора меньше или равен номерам классов наборов-«родителей», то необходимо проверить возможность поглощения ним других наборов дизъюнктов и провести операцию поглощения. Для добавляемой резольвенты необходимо определить связи с другими дизъюнктами, которые набор-резольвента наследует у дизъюнктов-«родителей». В результате резольвирования новых связей не возникает.

Если на некотором этапе выполнения алгоритма получена пустая резольвента, то S выполнимо и алгоритм заканчивает свою работу. Если на некотором этапе выполнения алгоритма невозможно найти пару дизъюнктов для резольвирования, то S невыполнимо.

6. Экспериментальные исследования

Для оценки эффективности предложенного в работе алгоритма была выполнена серия экспериментов. Критериями эффективности метода были выбраны число итераций (резольвирований) и максимальное число дизъюнктов за время работы алгоритма.

Анализ эффективности предложенного алгоритма проводился на множествах дизъюнктов различной мощностью и различной длиной алфавита. Результаты оценки являются средними по результатам 30 экспериментов. В таблице 1 представлен сравнительный анализ алгоритма резолюции при 0,1-ном представлении дизъюнктов в логике высказываний классического алгоритма резолюции на графе связей.

Сравнительный анализ предложенного алгоритма и алгоритма вывода на графе связей на ряде частных случаев показал существенное уменьшение числа выполняемых итераций (20-30%) при незначительном росте пространства поиска (5-10%).

В [6] были предложены следующие эвристики для поиска связи для резольвирования:

1) последовательное резольвирование связей треугольной матрицы связей от столбца с минимальным номером до столбца с максимальным номером;

- 2) резольвирование связей с максимальным количеством единиц;
- 3) резольвирование связей с минимальным количеством единиц;
- 4) выбирается та связь, количество ‘_’ которой минимально отличается от количества ‘_’ второго дизъюнкта.

Таблица - Сравнительный анализ алгоритма резолюции на графе связей и на 0,1-ном представлении дизъюнкторов в логике высказываний

Критерии оценки		Резолюция на графе связей		Резолюция на 0,1-ном представлении	
Длина алфавита	Число дизъюнкторов	Число вершин	Число итераций	Число наборов	Число итераций
5	10	11	7	6	4
	20	23	10	13	4
	50	50	10	36	3
10	10	12	13	11	10
	20	24	25	21	19
	50	56	50	46	43
20	20	22	29	22	23
	50	55	69	52	53
	100	107	131	103	89

Параметрами, по которым возможно характеризовать работу алгоритма, являются число итераций алгоритма и число промежуточных дизъюнкторов. Число итераций определяет время работы алгоритма, а число промежуточных дизъюнкторов показывает рост пространства поиска.

Представим временную характеристику работы алгоритма, как зависимость числа промежуточных дизъюнкторов от шага логического вывода:

$$Y=f(X),$$

где X – номер шага работы алгоритма, а Y – число промежуточных дизъюнкторов на этом шаге.

Такая зависимость позволяет получить подробную информацию о работе алгоритма, в зависимости от выбранных эвристик.

Тестовым примером служила сгенерированная программно КНФ, состоящая из 60 дизъюнкторов, а длина алфавита составила 10 литер. Как показано на рис. 1 резольвирование связей с максимальным числом единиц позволяет получить результат за минимальное число итераций, но при этом наблюдается кратковременный рост количества обрабатываемых дизъюнкторов.

Выбор связи по числу ‘_’ позволяет уменьшить такой рост, но при этом для получения результата требуется большее число итераций. Временная



Рис. 1. Временная характеристика работы алгоритма при выборе связей с максимальным числом единиц

характеристика работы алгоритма с применением такой эвристики представлена на рис. 2.

На основе полученных данных был предложен комплексный подход к выбору связи для резольвирования: выбирается та связь, количество ‘_’ которой минимально отличается от количества ‘_’ второго дизъюнкта; если таких дизъюнктов несколько, то происходит резольвирование связей с максимальным количеством единиц.

Временная характеристика работы алгоритма при таком выборе связей для резольвирования представлена на рис. 3 и показывает, что такая эвристика является наиболее универсальной.

6. Выводы

В настоящей работе предложен алгоритм резолюции в логике высказываний для 0-1-ного представления дизъюнктов, который в отличие от существующих методов позволяет работать не с КНФ высказываний, а со списком 0-1-ных наборов для которых реализованы операции присущие методу резолюции: поглощение дизъюнктов, удаление дизъюнктов-тавтологий, чистых дизъюнктов

На каждой стадии алгоритма предложены эвристики, которые позволяют уменьшить время выполнения алгоритма и число дополнительных дизъюнктов:

- сортировка наборов на стадии построения списка дизъюнктов позволяет разделить дизъюнкты на классы аналогично методу Девиса-Патнема, что позволило снизить вероятность появления резольвенты большей длины, чем длина дизъюнкта-родителя, а также уменьшить число сравнений во время предобработки матрицы связей, за счет того, что поглощаемые дизъюнкты будут находиться внизу матрицы, и не будут участвовать в сравнении;

- предложенные эвристики поиска связи для резольвирования имеют свои преимущества и недостатки в зависимости от ресурсов системы и поставленной задачи; так выбор связи, количество ‘_’ которой минимально отличается от количества ‘_’ второго дизъюнкта позволяет получить результат за минимальное число шагов, но при этом число промежуточных дизъюнктов возрастает до 20%, в то же время для выбора связи с максимальным числом единиц, рост пространства поиска является не значительным, но существенно увеличивается время выполнения алгоритма;

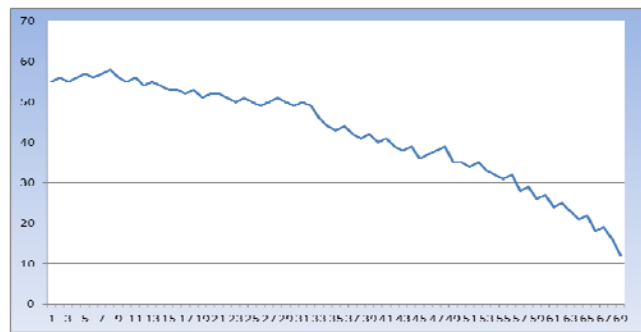


Рис. 2. Временная характеристика алгоритма при выборе связей по числу ‘_’

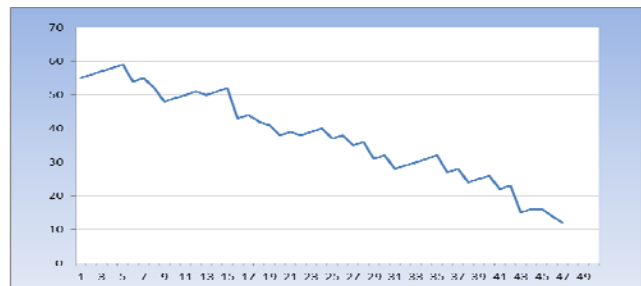


Рис. 3. Временная характеристика алгоритма с комплексной эвристикой выбора связи

– добавлении полученной резолюенты в начало матрицы связей позволяет часто получать ситуацию, когда она поглощает дизъюнкты-«родители», что также приведет к сокращению пространства поиска.

Проведено исследование эффективности работы алгоритма резолюции в логике высказываний для 0-1-ного представления дизъюнктов на ряде частных случаев, которое показало, что

– разработанный алгоритм уменьшает число выполняемых итераций, т. е. время выполнения алгоритма, в среднем на 24%;

– в среднем, рост пространства поиска по сравнению с выводом на графе связей уменьшился на 18%, и составил – 8%.

Результаты данной работы подтверждают эффективность использования 0-1-ного представления дизъюнктов для оптимизации алгоритма резолюции в логике высказываний

Список литературы: 1. *Gomez C.P. Satisfiability Solvers/ C.P.Gomez, H.Kautz, A. Sabharawal, B.Selman // Handbook of Knowledge Representation, 2008. – 301 с.* 2. *Вагин В.Н. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах / В.Н. Вагин, Е.Ю. Головина, А.А. Загорянская – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 704 с.* 3. *Аверин А.И. Исследование и разработка алгоритмов параллельного вывода на графовых структурах: Автореферат дис. ... кандидата технических наук / А.И. Аверин – М. : МЭИ, 2004. – 36с.* 4. *Claessen Koen. SAT-solving in practice / Koen Claessen, Niclas Een, Mary Sheeran and Niclas Sorensson // Proceedings of the 9th International Workshop on Discrete Event Systems. – Goteborg, Sweden, 2008. – С. 61-67.* 5. *Поцелуевская Е.А. Теоретическая и практическая сложность задачи о выполнимости булевых формул / Е.А. Поцелуевская // Интеллектуальные системы. - М. – РГГУ, 2009. – Т.13. – С. 455-476.* 7. *Волченко М.В. Алгоритм резолюции в логике высказываний при 0-1-ном представлении дизъюнктов / И.С. Грунский, М.В. Волченко // XII национальная конференция по искусственному интеллекту «КИИ-2010». – М. : Физматлит, 2010. – Т.1. – С.64-71.*

Поступила в редколлегию 11.06.2012

УДК 621.391.25

М.В. ЗАХАРЧЕНКО, докт.техн.наук, проф., прорект, Одеська національна академія зв'язку ім О.С.Попова,

В.Й. КІЛЬДІШЕВ, канд..техн.наук, доц., Одеська національна академія зв'язку ім О.С.Попова,

Ю.В. БЄЛОВА, викл.,асп., Одеська національна академія зв'язку ім О.С.Попова,

С.В. ХОМИЧ, викл.,асп., Одеська національна академія зв'язку ім О.С.Попова

ВПЛИВ КОРЕЛЬОВАНИХ ЗАВАД НА ПРОПУСКНУ ЗДАТНІСТЬ БЕЗПЕРЕРВНОГО КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ

Одержано аналітичні залежності між пропускнуою здатністю безперервного каналу та функцією кореляції сигналу при наявності канальних завад, сформульовані умови впливу коефіцієнта кореляції на пропускну здатність і швидкість передачі при обмеженій якості.

Ключові слова: Завада, канал зв'язку.

Получены аналитические зависимости между пропускной способностью непрерывного канала и функцией корреляции сигнала при наличии канальных помех, сформулированы условия влияния коэффициента корреляции на пропускную способность и скорость передачи при ограниченном качестве.

Ключевые слова: Помеха, канал связи.

Represents analytical relationship between the bandwidth of the channel and continuous function of the correlation signal in the presence of channel interference, formulated under the influence of the correlation coefficient on the capacity and transfer rate with a limited capacity.

Keywords: Noise, data channel.

Кореляційна залежність міжсимвольних завад та інформаційних сигналів

Канали (особливо телефонні), що надаються для передачі даних, володіють багатьма заважаючими факторами: флуктуаційною завадою, тремтінням фази, імпульсною завадою, короткочасними змінами рівня, спотвореннями АЧХ та ФЧХ та іншими. При цьому часто вважається, що головний негативний ефект при передачі дискретних сигналів вносять короткочасні впливи (імпульсні завади і скачки рівня). Це твердження справедливо по відношенню до систем передачі дискретної інформації (СПДІ), що працюють з відносно невисокими швидкостями (наприклад, зі швидкостями, що не перевищують 1200 біт/с при роботі по телефонному каналу зі смугою 300...3400 Гц). При передачі з великими швидкостями – 2400...9600 біт/с і вище, тобто при питомих швидкостях 1...3 біт/с Гц і більше, головну роль починають відігравати спотворення АЧХ і ФЧХ. Справа в тому, що ці спотворення викликають спотворення форми сигналів, що передаються, появу «хвостів» сигналів, що тягнуться за сигналами-переносниками та інтерферують з наступними сигналами-переносниками. Останнє явище отримало назву міжсимвольної інтерференції.

Якщо скачки рівня і імпульсні завади з'являються відносно рідко і тому спотворюють невелику частину сигналу (що часто припустимо), то дія спотворень передатної функції каналу носить стаціонарний характер. Якщо рівень міжсимвольної завади перевищує деяке допустиме значення, то вірність передачі буде нижче необхідної протягом сеансу зв'язку.

Практика експлуатації апаратури показала, що при використанні швидкостей передачі інформації біля 4800...9600 біт/с головним джерелом помилок в телефонному каналі є міжсимвольна інтерференція, що породжена його спотвореною передавальною функцією. Саме тому головну увагу необхідно приділяти боротьбі з двома постійно і спільно діючими заважаючими факторами: міжсимвольній інтерференції та флуктуаційній заваді.

Проаналізуємо

о для цього

спрощену

схему

передачі

дискретної

інформації, в

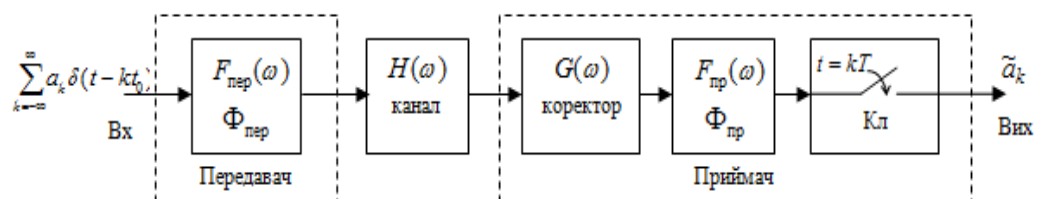


Рис. 1. Спрощена схема СПДІ з АІМ

якій використовується амплітудно-імпульсна модуляція (АІМ), що показана на рис. 1.

Процес модуляції полягає в тому, що формуючий фільтр передавача $\Phi_{\text{пер}}$ збуджується послідовністю δ -функцій, що поступають одна за одною через тактовий інтервал часу (тривалістю t_0), причому кожна з δ -функцій помножена на інформаційний параметр a_k , що приймає (випадково), наприклад, два можливих значення $+1$ і -1 згідно з полярністю імпульсів, що надходять від джерела даних. Формуючий фільтр передавача $\Phi_{\text{пер}}$, що має передаточну функцію

$F_{\text{пер}}(\omega)$, перетворює вхідний сигнал $\sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k \delta(t - kt_0)$ у вихідний модульований за амплітудою сигнал $\sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k f_{\text{пер}}(t - kt_0)$, де $f_{\text{пер}}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\Omega}^{\Omega} F_{\text{пер}}(\omega) e^{i\omega t} d\omega$ – імпульсна

реакція формуючого фільтру. Вихідний сигнал передавача $\sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k f_{\text{пер}}(t - kt_0)$ проходить через канал зв'язку з передаточною функцією $H(\omega)$, коректор з передаточною функцією $G(\omega)$, приймальний фільтр $\Phi_{\text{пр}}$ з передаточною функцією $F_{\text{пр}}(\omega)$ і, нарешті, ключову схему Кл, на виході якої будуть отримані числа $\tilde{a}_k$, $k = 0, \pm 1, \dots$. За відсутності завад і компенсації спотворень повинна виконуватися умова

$$a_k = \tilde{a}_k, \quad k = 0, \pm 1, \dots \quad (1)$$

тобто прийняті інформаційні параметри повинні дорівнювати переданим.

За наявності шуму і спотворень умова (1), як правило, не виконується і на вирішальну схему потрапляє спотворений сигнал.

Приймальний фільтр спільно з ключовою схемою утворюють демодулятор. Процес демодуляції полягає в тому, що вихідний сигнал приймального фільтра стробують в рівновіддалені моменти $t = t_0 k$, $k = 0, \pm 1, \dots$, і отримані відліки розглядаються як наближені значення переданих інформаційних параметрів. В сприятливій ситуації може виконуватися умова (1).

Позначимо загальну передаточну функцію від входу $\Phi_{\text{пер}}$ до виходу $\Phi_{\text{пр}}$ через $Q(\omega)$. При цьому має місце рівність

$$Q(\omega) = F_{\text{пер}}(\omega) H(\omega) G(\omega) F_{\text{пр}}(\omega).$$

Припустимо, що імпульсна реакція загального тракту $q(t) = \int_{-\infty}^{\infty} Q(\omega) e^{i\omega t} d\omega$ має властивість селективності:

$$q(kt_0) = \begin{cases} 1, & k = 0, \\ 0, & k \neq 0. \end{cases} \quad (2)$$

Тоді, виконуючи стробування сигналу на виході приймального фільтру

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k q(t - kt_0) \quad (3)$$

в моменти $t = lt_0$, $l = 0, \pm 1, \dots$, можна точно визначити значення інформаційних параметрів a_k , $k = 0, \pm 1, \dots$. Дійсно, для довільно взятого l -го моменту часу в силу умови (2)

$$q(lT - kt_0) = \begin{cases} 1, & k = l, \\ 0, & k \neq l. \end{cases}$$

Отже, вихідний сигнал (3) при $t = lt_0$ дорівнює a_l для будь-якого взятого цілого числа l .

Але якщо умова (2) не виконується і імпульсна реакція $q(t)$ має відмінне від нуля значення, принаймні, ще в одній відлікової точці $t = lt_0$ (крім точки $t = 0$, як це показано на рис. 2, де $l = 3$), то при стробуванні сигналу (3) в момент $t = 0$ на виході ключовою схеми отримаємо:

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k q(t - kt_0) \big|_{t=0} = a_0 + a_{-l} q(lt_0).$$

Зрозуміло, що a_0 – корисний сигнал, у той час як $a_{-l} q(lt_0)$ є завадою, що породжена символом із номером $-l$, тобто тим, що йде на l тактів раніше символа, що приймається. Заваду такого типу називають міжсимвольною. Вона викликана впливом переданого сигналу на спотворюючий тракт і за відсутності сигналу дорівнює нулю. При цьому спотворення ФЧХ мають тенденцію збільшувати «хвіст» імпульсної реакції, тобто породжувати міжсимвольний вплив.

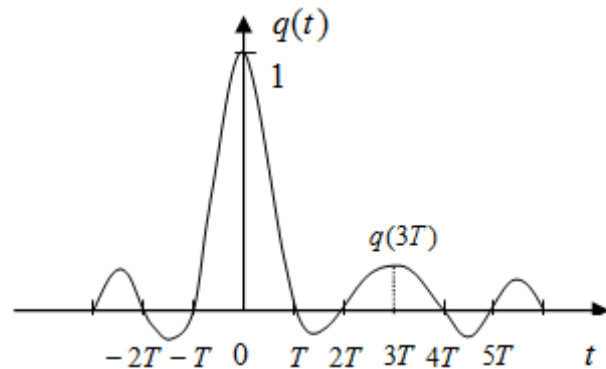


Рис. 2. Приклад імпульсної реакції

Вплив корельованих завад на пропускну здатність безперервного каналу

При аналізі пропускну здатності каналів із флуктуаційними параметрами досить зручним є геометричне зображення випадкових величин з різним ступенем взаємної кореляції.

Реалізацію коливання $U_{\text{рк}} = U_{\text{ск}} + U_{\text{шк}}$ на вході приймача можна представити як n -мірний вектор, який дорівнює сумі векторів реалізації сигналу $U_{\text{ск}}$ і адитивної реалізації завади $U_{\text{шк}}$ (рис.3,а).

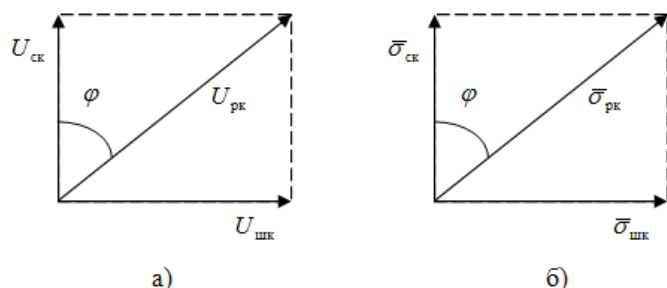


Рис. 3. Зображення сигналів у векторному виді

У приймальному пристрої приймається рішення про реєстрацію того сигналу, який найбільш близько розташований до коливання, що приймається. Тому в якості критерію прийому можна взяти деяке значення φ_0 кута φ між векторами $U_{\text{ск}}$ і $U_{\text{рк}}$. Якщо вектор $U_{\text{рк}}$ вийде за межі кута φ_0 , то відбудеться помилка.

Коефіцієнт кореляції між векторами $U_{\text{ск}}$ та $U_{\text{рк}}$ визначається [2]:

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{E[U_{\text{ск}} U_{\text{рк}}]}{\sqrt{E[U_{\text{ск}}^2] E[U_{\text{рк}}^2]}}, \quad (4)$$

де математичне сподівання двовимірного розподілу [6]:

$$E[U_{\text{ск}} U_{\text{рк}}] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_{\text{ск}} U_{\text{рк}} \omega(U_{\text{ск}} U_{\text{рк}}) dU_{\text{ск}} dU_{\text{рк}}, \quad (5)$$

а математичне сподівання квадратів складових

$$E[U_{\text{ск}}^2] = \sigma_{\text{ск}}^2; \quad E[U_{\text{рк}}^2] = \sigma_{\text{рк}}^2 = \sigma_{\text{ск}}^2 + \sigma_{\text{шк}}^2. \quad (6)$$

Так як вектори $U_{\text{ск}}$ та $U_{\text{шк}}$ не залежать один від одного, то

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{\sigma_{\text{ск}}}{\sigma_{\text{рк}}} = \frac{\sigma_{\text{ск}}}{\sqrt{\sigma_{\text{ск}}^2 + \sigma_{\text{шк}}^2}}. \quad (7)$$

Звідси випливає, що векторна діаграма випадкових векторів $U_{\text{ск}}$, $U_{\text{шк}}$ та $U_{\text{рк}}$ (рис. 3, а) еквівалентна векторній діаграмі не випадкових векторів $\bar{\sigma}_{\text{ск}}$, $\bar{\sigma}_{\text{шк}}$ та $\bar{\sigma}_{\text{рк}}$ (рис. 3, б), а коефіцієнт кореляції чисельно дорівнює косинусу кута φ між не випадковими векторами $\bar{\sigma}_{\text{ск}}$ та $\bar{\sigma}_{\text{шк}}$.

Взаємна кількість інформації між випадковими векторами $U_{\text{с}}$ та $U_{\text{р}}$ з нормальним законом розподілу можна виразити через коефіцієнт кореляції між однойменними їх складовими:

$$I(U_{\text{с}}; U_{\text{р}}) = -0,5 \sum_{k=1}^n \log_2(1 - p_k^2).$$

Тоді пропускна здатність каналу

$$C = -\frac{1}{T} \sum_{k=1}^n \log_2(1 - P_k^2) = -\Delta f_k \log_2(1 - P_k^2). \quad (8)$$

Особливості впливу корельованих завад

При використанні однопроменевих каналів перший сигнал, що має мінімальну затримку, можна розглядати як робочий сигнал з потужністю $P_{\text{с}}$, а решту затриманих сигналів – як перешкоду з потужністю $P_{\text{п}}$, корельовану з сигналом. Крім того, в каналі діють адитивні шуми з потужністю $P_{\text{ш}}$.

Векторна діаграма для цього випадку представлена на рис. 4, а, де $\bar{\sigma}_{\text{с}}$, $\bar{\sigma}_{\text{п}}$ і $\bar{\sigma}_{\text{ш}}$ – вектори, чисельно рівні середнім квадратичним значенням сигналу, корельованої завади та адитивних шумів.

Розкладемо корельовану заваду на дві складові

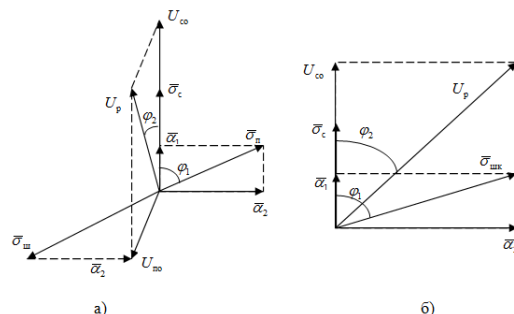


Рис. 4. Векторні моделі однопроменевих каналів: а) канал з адитивними шумами і корельованими завадами; б) канал з корельованими завадами

$$\bar{\alpha}_1 = \rho_{\text{сш}} \bar{\sigma}_{\text{ш}} , \quad \bar{\alpha}_2 = \sqrt{1 - \rho_{\text{сш}}^2} \bar{\sigma}_{\text{ш}} .$$

Синфазна складова $\bar{\alpha}_1$, жорстко корельовано з сигналом, утворює сумарний сигнал $U_{\text{со}} = \bar{\sigma}_{\text{с}} + \rho_{\text{сш}} \bar{\sigma}_{\text{ш}}$, а ортогональна складова $\bar{\alpha}_2$, некорельована сигналом, утворює сумарну заваду

$$U_{\text{шо}} = \sqrt{\bar{\sigma}_{\text{ш}}^2 + (1 - \rho_{\text{сш}}^2) \bar{\sigma}_{\text{ш}}^2} .$$

Результуюче коливання

$$U_{\text{р}} = \sqrt{U_{\text{со}}^2 + U_{\text{по}}^2} .$$

Коефіцієнт кореляції між $U_{\text{со}}$ та $U_{\text{р}}$ буде

$$\rho_{\text{ср}} = \cos \varphi_2 = \sqrt{\frac{U_{\text{со}}^2}{U_{\text{со}}^2 + U_{\text{по}}^2}} . \quad (9)$$

Підставивши вираз (8) у (9), одержимо вираз для пропускної здатності однопроменевого каналу з корельованими шумами:

$$C = \Delta f_{\text{к}} \log_2 \left(\gamma + \frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{п}} + P_{\text{ш}}} \right);$$

де

$$\gamma = \frac{\left(1 + \rho_{\text{сш}} \sqrt{\frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{с}}}} \right)^2}{1 - \rho_{\text{сш}} \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{п}} + P_{\text{ш}}}} .$$

Наявність кореляції між шумом і сигналом характеризується векторною діаграмою рис. 4, б, де $\bar{\sigma}_{\text{с}}$, $\bar{\sigma}_{\text{шк}}$ – вектори, що чисельно дорівнюють середнім квадратичним значенням сигналу і корельованих шумів; $\rho_{\text{сш}} = \cos \varphi_1$ – коефіцієнт кореляції між сигналом і шумами; $\bar{\alpha}_1$, $\bar{\alpha}_2$ – синфазна та ортогональна складові шумів; $U_{\text{со}}$ – сумарний сигнал; $U_{\text{р}}$ – результуюче коливання на вході приймального пристрою.

Коефіцієнт кореляції між $U_{\text{со}}$ та $U_{\text{р}}$, що чисельно характеризується $\cos \varphi_2$, буде

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(1 - \rho_{\text{сш}}^2) P_{\text{шк}}}{\sqrt{P_{\text{с}}} + \rho_{\text{сш}} \sqrt{P_{\text{шк}}}}} } \quad (10)$$

Тоді пропускна здатність каналу

$$C = \Delta f_{\text{к}} \log_2 (1 + \gamma h_{\text{сш}}^2), \quad (11)$$

де

$$\gamma = \frac{\left(1 + \frac{\rho_{\text{сш}}}{\sqrt{h_{\text{сш}}^2}}\right)^2}{1 - \rho_{\text{сш}}^2}; \quad (12)$$

$$h_{\text{сш}}^2 = \frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{шк}}} \quad (13)$$

Висновки

Вираз (12) графічно представлено на рис. 5, звідки випливає, що в залежності від коефіцієнта $\rho_{\text{сш}}$ і перевищенні сигналу над корельованими шумами $h_{\text{сш}}^2$ величина C змінюється в широких межах. Зростання C при $\rho_{\text{сш}} > 0$ пояснюється наявністю синфазної складової шумів, яка жорстко корельована з сигналом. При $\rho_{\text{сш}} < 0$ з'являється протифазна складова шумів, яка також жорстко корельовано з сигналом, і яка при цьому значенні $h_{\text{сш}}^2$ спочатку зрівнюється за величиною з сигналом (величина C зменшується до нуля), а потім перевершує його, починаючи виконувати функції переносника інформації (величина C починає зростати).

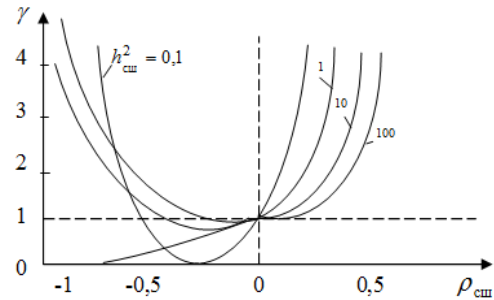


Рис. 5. Графіки $\gamma(\rho_{\text{сш}}; h_{\text{сш}}^2)$;

Список літератури: 1. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки [Текст] / Блейхут Р.; пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 576 с. 2. Benedetto S. Serial Concatenation of Interleaved Codes [Текст] / [S. Benedetto, D. Divsalar, D. Monlorsi, F. Pollara]. – IEEE Trans. Inf Theory. – 1998. – Vol. 44. – P. 909-926. 3. Иванова И.В. Анализ методов синдромного декодирования кодов Рида-Соломона [Текст] / Иванова И.В. – Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2005. – № 5. 4. Захарченко М.В. Системы передавання даних. – Т. 1: Завадостійке кодування: підручник [для студентів вищих технічних навчальних закладів] [Текст] / М.В. Захарченко – Одеса: Фенікс, 2009. – 448 с. 5. Захарченко Н.В., Условия разделения множеств исправляемых и обнаруживаемых ошибок в таймерных сигнальных конструкциях [Текст] / Н.В. Захарченко, М.М. Гаджиев, Е.Н. Мартынова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – 4/3 (34). – С.60-63. 6. Корн Г. Справочник по математике [Текст] / Г. Корн, Т. Корн – М.: 1974. – 830с.

Поступила в редколлегию 05.06.2012

УДК 519.7:681.2

Н.А. ЗУБРЕЦКАЯ, канд. техн. наук, доц., КНУТД, Киев,
С.С. ФЕДИН, докт. техн. наук, доц., проф., КНУТД, Киев

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПРОЕКТИРУЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ МНОГОМЕРНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ

У статті на основі застосування методу багатовимірної лінійної просторової екстраполяції розроблено алгоритм прогнозування показників якості електронних виробів на стадії їх проектування

Ключові слова: прогнозування, показники якості, просторова екстраполяція, проектування, електронні інкубатори.

В статье на основе применения метода многомерной линейной пространственной экстраполяции разработан алгоритм прогнозирования показателей качества электронных изделий на стадии их проектирования

Ключевые слова: прогнозирование, показатели качества, пространственная экстраполяция, проектирование, электронные инкубаторы.

On the basis of the method of multivariate linear extrapolation of the spatial prediction algorithm of quality electronic products at the design stage

Keywords: forecasting, quality, spatial extrapolation, design, electronic incubators.

Введение

При разработке сложных технических объектов приходится решать экстремальные задачи системного проектирования в многомерном пространстве исходных данных, называемом проектной ситуацией. Качество процесса проектирования образца новой техники и точность прогнозирования его параметров на различных стадиях проектирования являются тесно взаимосвязанными [1]. Прогнозирование необходимо для обоснованного выбора оптимальных параметров проектируемого изделия, обеспечивающих при заданных условиях экстремум установленного критерия качества. Однако существующие методы и алгоритмы поиска оптимальных решений требуют построения многофакторных моделей объекта и его среды, что связано со значительными затратами материальных и временных ресурсов.

Повышение эффективности прогнозирования возможно на основе синтеза математических и эвристических методов, что позволяет осуществлять выбор оптимальных параметров разрабатываемого образца по априорной информации о характеристиках аналогичных изделий без трудоемкой процедуры многопараметрической оптимизации [1, 2]. Такой подход положен в основу универсального метода многомерной пространственной экстраполяции, который можно применять для решения задач проектирования, что требует разработки механизмов реализации метода для конкретной продукции.

Анализ литературных данных и постановка проблемы

Метод пространственной экстраполяции позволяет получать оценки значений векторного поля прогнозируемого показателя, заданного в виде вектора решений Y по отдельным векторам наблюдений X , представляющих собой конечное множество точек в многомерном пространстве ситуаций [1, 2]. Компоненты вектора X характеризуют параметры наблюдаемых ситуаций – значения показателей качества изделий-аналогов. Компоненты вектора Y характеризуют прогнозные параметры проектируемого изделия. Задача пространственной экстраполяции состоит в оценке значений вектора Y_{n+1} с учетом информации о X_{n+1} . Решение задачи прогнозирования в такой постановке может рассматриваться как результат n наблюдений неизвестной функции F

$$Y=F(X),$$

где $Y = (y_1, \dots, y_m)$ – вектор прогнозных параметров продукции; $X = (x_1, \dots, x_k)$ – вектор текущих параметров продукции (факторов прогнозного фона).

Задача построения прогнозной модели сводится к определению вида неизвестной векторной функции F векторного аргумента X по конечному числу наблюдений n с целью восстановления прогнозных значений Y .

Для двумерного случая при решении такой задачи вводятся два обучающих вектора – линейные параметризованные пространства: пространство ситуаций X , задаваемое параметрами x_1 и x_2 ; пространство решений Y , определяемое параметрами y_1 и y_2 .

Через известные ситуации X_1 и X_2 с известными векторам F_1 и F_2 проводится прямая линия (рис.1) [1], характеризующая подпространство проектных ситуаций $\{X'\}$, а через точки Y_1 и Y_2 – линия, характеризующая подпространство решений $\{Y'\}$, которые определяются по формулам

$$\begin{aligned}\{X'\} &= X_1 + \lambda(X_2 - X_1), \\ \{Y'\} &= Y_1 + \mu(Y_2 - Y_1),\end{aligned}$$

где λ и μ – коэффициенты пропорциональности.

С учетом гипотезы о линейности преобразования $\{X'\} \rightarrow \{Y'\}$ вводится функция близости вида

$\Phi(X, X') = \|X - X'\|^2$. После минимизации $\Phi(X, X')$ при $\lambda = \mu$ находится значение параметра λ и вектора F_3 по формуле

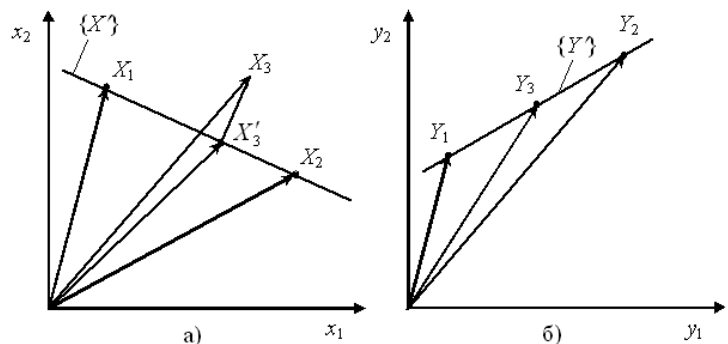


Рис.1. Многомерная линейная экстраполяция по двум обучающим векторам на плоскости: а) – пространство ситуаций; б) – пространство решений

$$F_3 = F_1 + \lambda(F_2 - F_1). \quad (1)$$

Вектор F_3 является оптимальным в новой проектной ситуации X_3' .

Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка алгоритма многомерной пространственной экстраполяции для прогнозирования показателей качества электронных изделий на стадии их проектирования

Экспериментальные данные и их обработка

Применение метода многомерной пространственной экстраполяции для решения задачи прогнозирования и выбора оптимальных значений показателей качества электронных изделий на стадии их проектирования реализовано на примере электронных инкубаторов (табл.1) [3].

Для трех моделей электронных инкубаторов (изделий-аналогов M_1, M_2, M_3) при априорно известных значениях их разноразмерных характеристик $x_1 - x_{13}$ проведено симуляционное прогнозирование с целью получения оценки погрешности результата пространственной экстраполяции. В качестве выходной характеристики подпространства решений $\{Y'\}$ выбрана средняя оценка обобщенного показателя качества инкубаторов: $F_1=0,522, F_2=0,552, F_3=0,581$ (см. таблицу).

Таблица - Значения показателей качества моделей-аналогов электронных инкубаторов

M_i	F_i	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}
M_1	0,522	0,21	0,41	0,37	0,70	0,32	0,67	0,50	0,33	0,39	0,50	7	35	9000
M_2	0,552	0,12	0,34	0,11	0,23	0,31	0,41	0,23	0,31	0,38	0,30	8	50	10050
M_3	0,581	0,07	0,11	0,28	0,46	0,30	0,40	0,30	0,25	0,40	0,49	10	60	11550

Математическая постановка задачи: для двух известных проектных ситуаций M_1 и M_2 с известными выходными характеристиками (обобщенными критериями качества изделий) $F_1 = 0,52$, $F_2 = 0,55$ необходимо найти выходную характеристику F'_3 проектируемого изделия M_3 . Для оценки погрешности прогноза значение выходной характеристики F'_3 , восстановленное методом пространственной экстраполяции, необходимо сравнить с известным значением изделия-аналога F_3 .

Алгоритм метода многомерной пространственной экстраполяции для прогнозирования показателей качества электронных изделий включает этапы, представленные на рис. 2.

Для реализации представленного алгоритма составим подпространство известных проектных ситуаций по формуле

$$\{X'\} = M_1 + \lambda(M_2 - M_1).$$

Покоординатное представление подпространства ситуаций имеет вид

$$\{X'\} = \left\{ \begin{aligned} &((0,21 - 0,9\lambda), (0,41 - 0,7\lambda), (0,37 - 0,26\lambda), (0,7 + 0,16\lambda), (0,32 - 0,01\lambda), \\ &((0,67 - 0,26\lambda), (0,5 - 0,27\lambda), (0,33 - 0,02\lambda), (0,39 - 0,01\lambda), (0,50 - 0,20\lambda), \\ &((7 + \lambda), (35 + 15\lambda), (9000 + 1050\lambda)) \end{aligned} \right\}$$

Введем функцию близости

$$\Phi(M_3 - X') = \|M_3 - X'\|^2.$$

Количественное представление функции близости с учетом априорных данных (см. табл.1) имеет вид

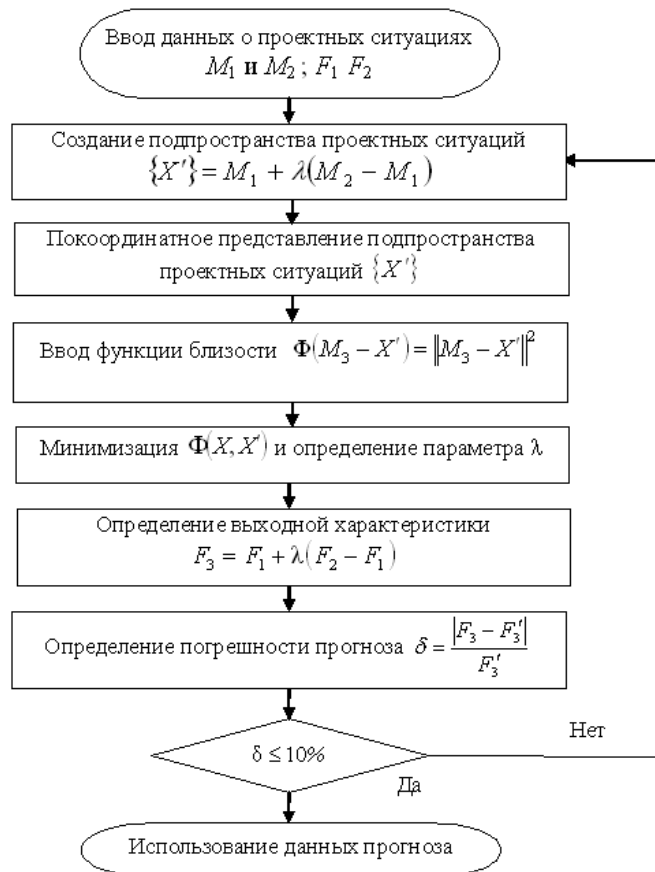


Рис. 2. Алгоритм многомерной пространственной экстраполяции для прогнозирования показателей качества электронных изделий

$$\Phi(M_3 - X') = (0,9\lambda - 0,14)^2 + (0,7\lambda - 0,3)^2 + (0,026\lambda - 0,09)^2 + (0,39 - 0,16\lambda)^2 + \\ + (0,01\lambda - 0,02)^2 + (0,26\lambda - 0,23)^2 + (0,27\lambda - 0,2)^2 + (0,02\lambda - 0,08)^2 + \\ (0,01\lambda + 0,01)^2 + (0,2\lambda - 0,01)^2 + (3 - \lambda)^2 + (25 - 15\lambda)^2 + (2550 - 1050\lambda)^2$$

Минимизируя функцию близости, определяем ее производную по параметру λ

$$\frac{\partial \Phi(\lambda)}{\partial \lambda} = 2205455,014\lambda - 5355757,036 = 0.$$

Решая полученное уравнение, находим параметр $\lambda=2,43$.

По формуле (1) получим значение выходной характеристики $F'_3 = 0,595$.

Сравнивая значения F_3 и F'_3 , получим оценку относительной погрешности результата многомерной пространственной экстраполяции δ по формуле

$$\delta = \frac{|F_3 - F'_3|}{F'_3} = \frac{|0,581 - 0,595|}{0,595} \approx 2,4\%.$$

Полученное значение погрешности δ свидетельствует о достаточно высокой точности метода многомерной линейной пространственной экстраполяции.

Выводы

Использование разработанного алгоритма, позволяет эффективно применять метод многомерной линейной пространственной экстраполяции при решении задачи прогнозирования показателей качества изделий-аналогов на стадии их проектирования.

Список литературы: 1. Растринин Л.А. Экстраполяционные методы проектирования и управления. / Л.А. Растринин, Ю.П. Пономарев. – М.: Машиностроение, 1986. – 120 с. 2. Назаров А.В. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем / А.В. Назаров, А.И. Лоскутов – СПб.: Наука и техника, 2003. – 384 с. 3. Зубрецькая Н.А. Оценка качества электронных изделий по обобщенному показателю с использованием программного модуля / Н.А. Зубрецькая, С.В. Барилко, А.А. Поликарпов, С.С. Федин // Управління проектами, системний аналіз і логістика. – 2012. – № 9. – С. 62-67.

Поступила в редколлегию 11.06.2012

УДК 681.586.3:681.5.017

Є.П. ПІСУН, докт. техн. наук, проф., НУ «Львівська політехніка» Львів,
Р.Я. ГРУДЕЦЬКИЙ, асис, Луцький національний технічний університет

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ГАЗОГІДРОДИНАМІЧНИХ ДРОСЕЛЬНИХ СХЕМ

У статті наведено характеристики і функціональні можливості побудови вимірювальних дросельних схем, наведено розробку програмного додатку для автоматизації побудови дроселів будь-якого порядку.

Ключові слова: дросель, вимірювальна схема, математична модель, система нелінійних рівнянь.

В статье приведены характеристики и функциональные возможности построения измерительных дросельных схем, приведена разработка программного приложения для автоматизации построения дроселей любого порядка.

Ключевые слова: дроссель, измерительная схема, математическая модель, система нелинейных уравнений.

The article presents the characteristics and functionality of the building measuring throttle schemes are developing software applications for automating build throttles any order.

Keywords: throttle, metering scheme, the mathematical model, the system of nonlinear equations.

1. Вступ

Характеристики і функціональні можливості газогідродинамічних дросельних пристроїв визначаються схемою їх побудови, типом застосованих в цій схемі дросельних елементів і режимів живлення, конструктивними характеристиками дроселів і параметрами середовища. Для вирішення задачі структурно-параметричної оптимізації при побудові таких пристроїв необхідно описати структуру дросельних схем газогідродинамічних пристроїв, сформулювати правила їх синтезу. Це дозволить створювати нові схеми, на основі яких будувати газогідродинамічні пристрої, зокрема пристрої контролю складу плинних речовин із розширеними функціональними можливостями.

Розглянувши моделювання структури газогідродинамічних дросельних схем, а саме структури складених дросельних елементів, постає задача створення програмного забезпечення (програмного комплексу) для автоматичної побудови всіх можливих газогідродинамічних схем дроселів n -го порядку, отриманих шляхом поєднання схем $(n-1)$ -го порядку. Окрім того, цей програмний комплекс повинен не тільки проектувати можливі схеми, але й будувати їх математичну модель для подальшого дослідження.

2. Аналіз проблеми та методи вирішення

Для побудови дросельної схеми та її математичної моделі використаємо операції прямого і непрямого декартового множення вихідних елементів. Для такої побудови за вхідні параметри використовуємо множину дросельних елементів $D_1 = \{L, T, Z\}$, де L – ламінарний, T – турбулентний та Z – змішаний дросельний елемент [1].

Крім того одним з основних вхідних параметрів є порядок схеми, тобто скільки елементів використано в моделі. Вважаємо, що кількість дроселів кожного виду необмежена.

Прямий декартовий добуток відбувається за правилами множення матриць. Наведемо приклади: якщо множини вихідних елементів

$$A = \{a\} \text{ і } B = \{b\}, \text{ то } A \times B = \{< a, b >\},$$

$$\text{якщо ж } A = \{a, b\}, \text{ а } B = \{a, b, c\}, \text{ то}$$

$$A \times B = \{ < a, a >, < a, b >, < a, c >, < b, a >, < b, b >, < b, c > \}.$$

При використанні операції прямого добутку відіграє роль порядок включення дросельних елементів у схему, адже від їх послідовності змінюється суть побудованої схеми, а відповідно і моделі.

Прямий декартовий добуток елементів дає змогу знайти всі варіанти послідовного підключення кортежів або дросельних елементів.

При паралельному з'єднанні двох вихідних елементів порядок їх включення в пари вже ролі не відіграє.

Для знаходження всіх таких пар введемо поняття непрямого декартового добутку.

Непрямий добуток множин A і B позначимо $A * B$. Так, якщо

$A = \{a, b\}$, а $B = \{a, b, c\}$, то

$A * B = \{ [a, a], [a, b], [a, c], [b, b], [b, c] \}$.

Аналогічно шукають шеренги більшої довжини, а саме: якщо

$A = \{a, b\}$, $B = \{a, b, c\}$, $C = \{a, c\}$ то

$A * B * C = \{ [a, a, a], [a, a, c], [a, b, a], [a, b, c], [a, c, a], [a, c, c], [b, b, a], [b, b, c], [b, c, c] \}$

Для опису структури дросельних схем газогідродинамічних пристроїв контролю застосуємо наступні поняття: первинні дроселі називаємо дроселями першого порядку, а дроселі, утворені із S первинних дроселів – складеними дроселями S -го порядку. В зв'язку з цим дроселі другого порядку – це складені дроселі, утворені із будь-яких двох дроселів першого порядку ($S = 1 + 1$), а дроселі третього порядку – дроселі, утворені або із будь-яких трьох дроселів першого порядку, або із будь-якого одного дроселя другого порядку і будь-якого одного дроселя першого порядку ($S = 1 + 1 + 1$, $S = 2 + 1$; $S = 1 + 2$) і т.д.

Таким чином, складені дроселі S -го порядку завжди утворюють послідовним чи паралельним з'єднанням двох дроселів нижчих порядків, а сума порядків первинних дроселів, які утворюють складений дросель завжди дорівнює S .

3. Вирішення поставлених завдань

Застосовуючи розглянуту вище теорію впорядкованих множин, розроблено правила синтезу структури дросельних схем газогідродинамічних пристроїв контролю складу речовин, а саме: при відомій n -елементній множині D_1 типів первинних дроселів множину всіх структур дроселів S -го порядку знаходимо шляхом об'єднання множин дроселів нижчих порядків, утворених послідовним та паралельним з'єднанням вихідних дроселів, при цьому множини (кортежів) дроселів, утворених послідовним з'єднанням, знаходимо застосовуючи операцію прямого декартового добутку множин, а множини (шеренг) дроселів, утворених паралельним з'єднанням, знаходимо застосовуючи операцію непрямого добутку.

Для реалізації вище викладених правил створено програмний комплекс, який виконує наступну послідовність дій (функцій):

1. Задати множину первинних елементів.
2. Задати порядок синтезованого дроселя.
3. Знайти всі можливі пари дроселів нижчих порядків, які б в результаті складення давали дросель вищого порядку.
4. Попарно виконати прямий декартовий добуток рядків матриці, знайдених попередньо (див. пункт 3).
5. Аналогічно виконати непрямий добуток.
6. Записати результати, отримані прямим та непрямым декартовим множенням у відповідний рядок матриці результатів. Номер рядка цієї матриці буде визначати порядок складеного дроселя.
7. З отриманих варіантів виключити схеми, які повторюються.

8. Записати результат в новий рядок матриці (номер рядка матриці визначається порядком знайденого дроселя).

9. Якщо номер новоутвореного рядка співпадає з порядком заданої схеми (вхідний параметр), дії завершити.

10. Побудувати математичні моделі кожної зі знайдених дросельних схем.

Відповідно дії 3-10 повторюються поки порядок синтезованих схем буде нижчий заданого. При досягненні заданого порядку, синтез дросельних схем зупиняється.

Для виконання цих дій в автоматичному режимі створено програмний комплекс, який використовуючи описані вище правила дозволяє синтезувати дроселі n -го порядку та будувати їх математичні моделі.

Цей комплекс було розроблено за допомогою програмного забезпечення Borland Delphi – CodeGear RAD Studio 2009 з використанням бази даних FireBird 1.5.

Додаток включає такі компоненти (рис. 1.):

- Edit – для введення вхідних даних, а саме кількість первинних елементів та порядок синтезованого дроселя;
- Button – для запуску програми на виконання;
- IBDatabase, IBTransaction – для підключення бази даних;
- ListBox – для відображення всіх можливих кортежів з'єднань дроселів;
- PaintBox – для графічного зображення схеми з'єднань;
- Image – для відображення математичної моделі.

В даній програмній реалізації вибір методу обрахунку залежить від кількості первинних елементів системи, а саме при кількості елементів від 1 до 3 моделювання простих дросельних схем, при більшій кількості моделювання складних дросельних схем.

Після вибору кількості первинних елементів та порядку дроселя є

виконання процедур прямого та непрямого декартового добуток. Результати записуються у рядок матриці відповідно до порядку синтезованого дроселя.

Всі знайдені можливі варіанти побудови дроселів заносяться до основного масиву програми. Цей масив перевіряється на наявність повторень схем.

При наявності повторення дублікат буде видалено.

Важливо, що при послідовному з'єднанні елементів відіграє роль порядок їх включення, а при паралельному – ні. Тобто, $\langle a, b \rangle$ та $\langle b, a \rangle$ - це різні схеми послідовного з'єднання елементів a та b , а з'єднання $[a, b]$ та $[b, a]$ – однакові.

4. Результати роботи програмного додатку

Після отримання всіх можливих дроселів заданого порядку, здійснюється перенесення цих схем до компонента ListBox (рис. 2 та 3).

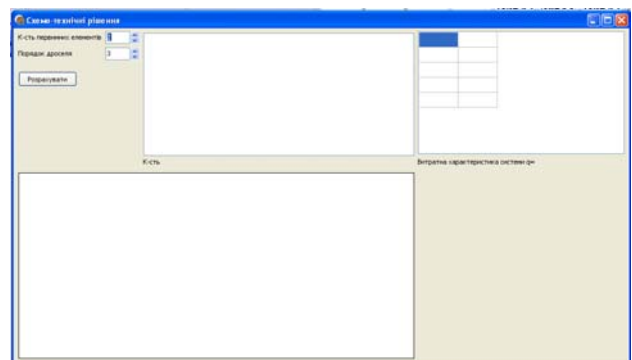


Рис. 1. Стартове вікно додатку

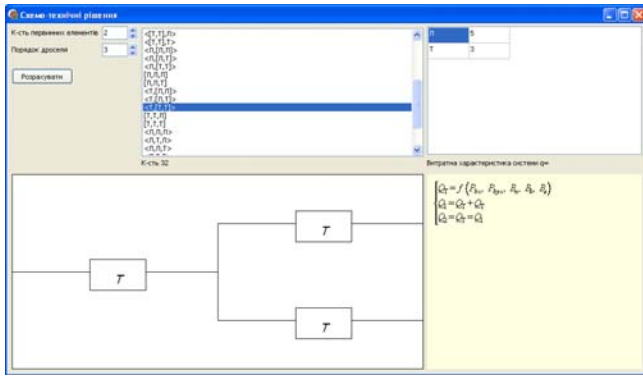


Рис. 2. Результати пошуку всіх дросельних схем даного порядку та графічне зображення вибраної схеми (третій порядок схеми)

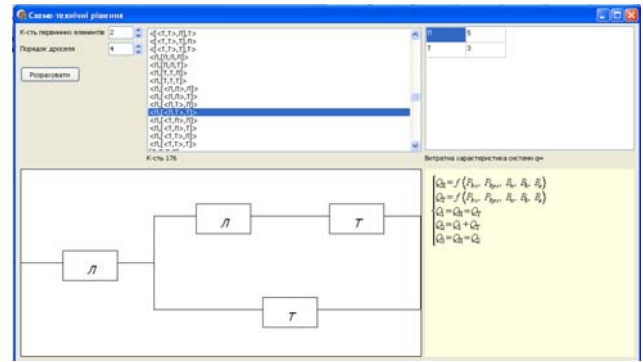


Рис. 3. Результати пошуку всіх дросельних схем даного порядку та графічне зображення вибраної схеми (четвертий порядок схеми)

Проаналізувавши кожну отриману дросельну схему побудуємо математичну модель цієї схеми.

Як приклад, розглянемо правила моделювання дроселів другого порядку.

Математична модель складеного дроселя другого порядку відповідає, як і для дроселя першого порядку, його витратній характеристиці. Витратні характеристики дроселів другого порядку, утворених послідовним з'єднанням первинних дросельних елементів, знаходять із системи рівнянь:

$$\begin{cases} Q_{II} = Q_1 = Q_2; \\ Q_1 = f_1(P_{вх}, P_A, B_{к1}, B_n, B_{e1}); \\ Q_2 = f_2(P_A, P_{вих}, B_{к2}, B_n, B_{e2}); \end{cases} \quad (1.1)$$

де Q_{II} – масова витрата рідини через дросель другого порядку; Q – масова витрата рідини через дросель; $P_{вх}$ і $P_{вих}$ – абсолютні тиски рідини відповідно на вході і на виході дроселя другого порядку; P_A – міждросельний тиск, а індекси 1 і 2 відносять змінні в рівняннях відповідно до першого і другого по ходу руху середовища первинних дросельних елементів.

Для дроселів другого порядку, утворених паралельним з'єднанням дросельних елементів, витратну характеристику визначають із системи рівнянь:

$$\begin{cases} Q_{II} = Q_1 + Q_2; \\ Q_1 = f_1(P_{вх}, P_{вих}, B_{к1}, B_n, B_{e1}); \\ Q_2 = f_2(P_{вх}, P_{вих}, B_{к2}, B_n, B_{e2}). \end{cases} \quad (1.2)$$

В (1.2) індекси 1 і 2 відносять змінні відповідно до верхнього і нижнього первинного дросельного елемента.

Використовуючи (1.1) та (1.2) будемо розглядати послідовне з'єднання дроселів будь-якого порядку як рівність їх витратних характеристик, а паралельне з'єднання як їх суму.

Таким чином, розроблено процедуру, за допомогою якої відбувається аналіз синтезованої схеми та побудова математичної моделі.

Результати роботи цієї процедури зображено на рис. 4

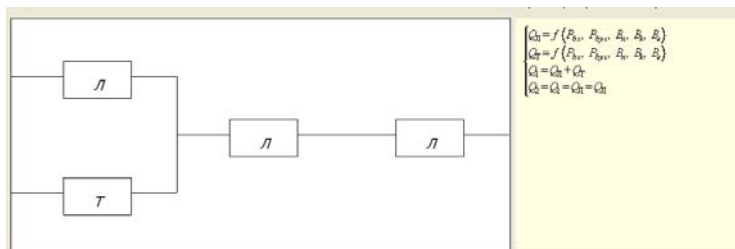


Рис. 4. Візуальне представлення дросельної схеми 4-го порядку та математична модель

5. Висновки

Отже, в результаті отримано програмний комплекс, який дозволяє будувати дросельні схеми n-ного порядку, а також створювати їх структурні схеми та математичні моделі.

Отриманий програмний комплекс використано для дослідження дросельних схем, побудови їх математичних моделей.

Список літератури: 1. Пістун Є.П., Леськів Г.Ф. Побудова та моделювання газогідродинамічних вимірювальних схем на двох дросельних елементах // Методи та прилади контролю якості. – 2002. – № 9. – С.35-38. 2. Пістун Є.П., Леськів Г.Ф. Застосування теорії чисел для моделювання та проектування газодинамічних дросельних пристроїв // Труды Одесского политехнического университета: Научный и производственно-практический сборник по техническим и естественным наукам. – Одесса. – 2001. – Вып.3(15). – С.109-114.

Поступила в редколлегию 11.06.2012

УДК 656.13+612.821

Н.У. ГЮЛЕВ, канд. техн. наук, доц., ХНАГХ, Харьков,
В.К. ДОЛЯ, докт. техн. наук, проф., зав.каф., ХНАГХ, Харьков,
М.И. КРАМАРОВА, студ., ХНАГХ, Харьков

ОБ ИЗМЕНЕНИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ВОДИТЕЛЯ-МЕЛАНХОЛИКА В ТРАНСПОРТНОМ ЗАТОРЕ

Наведено фактори, що впливають на функціональний стан водія. Представлена регресійна модель впливу транспортного затору на функціональний стан водія-меланхоліка.

Ключові слова: функціональний стан, регресійна модель, транспортний затор, показник активності регуляторних систем.

Приведены факторы, влияющие на функциональное состояние водителя. Представлена регрессионная модель влияния транспортного затора на функциональное состояние водителя-меланхолика.

Ключевые слова: функциональное состояние, регрессионная модель, транспортный затор, показатель активности регуляторных систем.

Shows the factors that influence the functional state of the driver. Represented by the regression model the influence of congestion on the functional state of the driver-melancholic.

Keywords: functional status, the regression model, the transport route, the index of activity of regulatory systems.

1. Введение

Водитель является главным звеном системы «водитель-автомобиль-дорожная среда». От его функционального состояния зависит выбираемая им

стратегия поведения, от которого во многом зависит безопасность движения и своевременность доставки грузов и пассажиров к пунктам назначения. На функциональное состояние водителя отрицательно воздействуют транспортные заторы.

2. Постановка проблемы

Транспортные заторы возникают вследствие превышения интенсивности транспортного потока над пропускной способностью улиц и дорог. Они приводят к росту эмоционального напряжения водителя и к его утомлению [1, 2]. На изменение состояния водителя влияют его индивидуально-типологические свойства или темперамент [3, 4].

Это свидетельствует о важности проведения исследований по оценке влияния транспортного затора на функциональное состояние водителя.

3. Анализ последних исследований и публикаций

В работе [1] рассмотрено влияние транспортного затора на функциональное состояние водителя.

Автором работы [2] приведены результаты исследований изменения функционального состояния водителей на участках дорожной сети и на остановочных пунктах маршрутного транспорта.

Некоторые психофизиологические особенности в работе водителя рассмотрены в работах [5-7].

Однако задача влияния транспортного затора на функциональное состояние водителя в зависимости от его темперамента исследована не в полном объеме.

4. Цель исследования

Цель исследования состоит в разработке регрессионной модели влияния транспортного затора на функциональное состояние водителя-меланхолика.

5. Основной материал

Темперамент – это психическое свойство личности, характеризующееся динамикой протекания психических процессов. Различают четыре основных темперамента: сангвиник, холерик, флегматик, меланхолик.

В работе приведены результаты исследований по разработке регрессионной модели для водителей с типом нервной системы меланхолик.

Меланхолик наименее устойчивый тип нервной системы со слабыми нервными процессами, для которого характерна медленная смена настроения. Характеризуется однообразием чувств, которые часто находят внешнее проявление. Часто несдержан и нередко замкнут. Отличается низкой общительностью и нерешительностью действий.

В чистом виде темпераменты встречаются очень редко. Человек, как правило, сочетает в себе ряд черт характерных для нескольких темпераментов. Темперамент оказывает влияние на темпы протекания психических процессов и проявляется в поведении, поступках и действиях людей.

В соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [8], при составлении математической модели были отобраны следующие факторы: возраст водителя, стаж работы водителя, число полос на дороге, эргономические характеристики автомобиля, длительность пребывания в транспортном заторе, величина функционального состояния водителя перед затором.

Функциональное состояние водителя оценивалось путем математического анализа сердечного ритма водителя и определения показателя активности регуляторных систем (ПАРС) по методу профессора Баевского Р.М. [9].

Для составления математической модели влияния транспортного затора на функциональное состояние водителя-меланхолика была выбрана модель линейного вида. При разработке модели были использованы известные методы статистики и регрессионного анализа.

Разработанная модель имеет следующий вид:

$$P_k = 0,013B_v + 0,065T_z + 0,913P_n,$$

где P_k – ПАРС при выходе из транспортного затора, баллы;

B_v – возраст водителя, лет;

T_z – длительность транспортного затора, мин;

P_n – ПАРС при входе в транспортный затор, баллы.

Результаты расчетов параметров модели приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1- Характеристика модели функциональное состояние водителя в транспортном заторе

Факторы	Обозначение, размерность	Границы измерений	Коэффициент	Стандартная ошибка	Критерий Стьюдента	
					Расчетный	Табличный
Возраст водителя	B_v , лет	21-55	0,013	0,004	3,53	2,0
Длительность транспортного затора	T_z мин	5 - 19	0,065	0,010	6,20	2,0
ПАРС при входе в транспортный затор	P_n баллы	2,4- 5,8	0,913	0,042	21,74	2,0

Таблица 2 - Доверительные интервалы коэффициентов модели

Факторы	Нижняя граница	Верхняя граница
Возраст водителя	0,005	0,021
Длительность транспортного затора	0,044	0,086
ПАРС при входе в транспортный затор	0,830	0,997

Из таблицы 1 и 2 видно, что в разработанной математической модели значимыми оказались только три фактора. Об их значимости свидетельствует превышение расчетного значения критерия Стьюдента над табличным и отсутствие нуля в доверительных интервалах коэффициентов модели.

Оценка разработанной модели представлена в таблице 3.

Таблица 3- Результаты статистической оценки модели

Показатели	Значение
Критерий Фишера: расчетный	5058
Коэффициент множественной корреляции	0,99
Средняя ошибка аппроксимации, %	5,87

Превышение расчетного значения критерия Фишера над табличным, равным 1,36, свидетельствует о высокой информационной способности модели. Коэффициент множественной корреляции свидетельствует о высокой тесноте связи между включенными в модель факторами и функцией.

Адекватность разработанной модели оценивалась показателем средней ошибки аппроксимации, который равен 5,87%. Эта ошибка является допустимой, а модель может быть применена для определения функционального состояния водителя-меланхолика в транспортном заторе.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

Проведенные исследования свидетельствуют об объективном и отрицательном влиянии транспортного затора на функциональное состояние водителя. В результате разработки регрессионной модели выявлены наиболее значимые факторы, влияющие на состояние водителя в транспортном заторе. Разработанная модель правильно отражает влияние транспортного затора на функциональное состояние водителя- меланхолика и может быть применена для практического использования. Дальнейшие исследования могут быть направлены на установление зависимостей влияния транспортного затора на время реакции водителей разных темпераментов.

Список литературы: 1. *Гюлев, Н.У.* Влияние времени простоя автомобиля в дорожном заторе на функциональное состояние водителя / *Н. У. Гюлев* // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2011. — Т.1/10(49). — С. 50–52. 2. *Давидіч, Ю. О.* Проектування автотранспортних технологічних процесів з урахуванням психофізіології водія / *Ю. О. Давидіч*. — Харків : ХНАДУ, 2006. — 292 с. 3. *Гюлев, Н.У.* К вопросу о зависимости функционального состояния водителя от его индивидуально – типологических свойств / *Н.У. Гюлев* // Комунальне господарство міст: науково-технічний збірник. — Х.: ХНАМГ, 2011. — Вип. 97. — с. 314–319. 4. *Гюлев, Н.У.* Влияние темперамента на функциональное состояние водителя в транспортном заторе / *Н. У. Гюлев, В.К. Доля* // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2012. — Т.2/3(56). — С. 39–41. 5. *Мишури́н, В. М.* Психофизиологические основы труда водителей автомобилей : учеб. пособие / *В. М. Мишури́н, А. Н. Романов, Н. А. Игнатов*. — М. : МАДИ, 1982. — 254 с. 6. *Лобанов, Е. М.* Проектирование дорог и организация движения с учетом психофизиологии водителя / *Е. М. Лобанов*. — М. : Транспорт, 1980. — 311 с. 7. *Вайсман, А. И.* Основные проблемы гигиены труда водительского состава автотранспорта : автореф. дис. ... д-ра мед. наук: 03.12.02 / *А. И. Вайсман*; — М., 1975. — 37 с. 8. *Френкель, А. А.* Многофакторные корреляционные модели производительности труда / *А. А. Френкель*. — М. : Экономика, 1966. — 96 с. 9. *Баевский, Р. М.* Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе / *Р. М. Баевский, О. И., Кириллов, С. З. Клецкин*. — М.: Наука, 1984. — 222 с.

Поступила в редколлегию 11.06.2012

А.В. ГАДЯЦКИЙ, зав.сект., УкрНИИ протезирования, Харків,
В.С. КАЧЕР, канд. техн. наук, зав.лаб., УкрНИИ протезирования, Харків,
Ю.Н. ЗАДЕРЕЙ, м.н.с., УкрНИИ протезирования, Харків,
Л.К. РОМАН, науч.сотр., УкрНИИ протезирования, Харків,
И.Н. ВАСИЛЕНКО, м.н.с., УкрНИИ протезирования, Харків

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОРТЕЗИРОВАНИЯ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ФОТОКАМЕР С БОЛЬШОЙ ДИСТОРСИЕЙ

В статті наведено порівняльний аналіз методів оцінки результатів ортезування нижніх кінцівок. Представлено схему вимірювань і математичний апарат для мінімізації впливу дисторсії об'єктиву фотокамери на результати вимірювань.

Ключові слова: ортезування, дисторсія, фотокамера, калібрування.

В статье приведен сравнительный анализ методов оценки результатов ортезирования нижних конечностей. Представлены схема измерений и математический аппарат для минимизации влияния дисторсии объектива фотокамеры на результаты измерений.

Ключевые слова: ортезирование, дисторсия, фотокамера, калибровка.

The comparative analysis of methods of estimation of results of orthotic treatment has been presented. The scheme of measurement and a mathematical device for minimization of influence of distortion of a camera objective on results of measurement have been presented.

Keywords: orthotic treatment, distortion, camera, calibration.

1. Введение

В настоящий момент в Украине, как и во всем мире, появляется множество реабилитационных методик и ортезных конструкций, направленных на восстановление двигательных функций опорно-двигательного аппарата. Ортезы на нижние конечности составляют большую часть среди различных видов ортезов.

Цель реабилитации при ортезировании нижних конечностей зависит от патологии пациента. Назначение ортеза и выполняемые им функции регламентируются ISO 8551 [1]. Исходя из функций, необходимо контролировать достигнутый эффект реабилитации при ортезировании нижних конечностей для различных ортезных систем.

Быстрый прогресс компьютерной и цифровой фото- и видеотехники, а также развитие фотограмметрических методов измерений в последние годы позволяет заменить или дополнить используемые в настоящее время измерительные системы их более совершенными оптическими аналогами. Применение оптических методов измерений в сравнении с другими позволяет значительно сократить время проведения, повысить точность измерений и снизить стоимость обследования.

2. Анализ существующих средств и методов оценки результатов ортезирования нижней конечности

В положении стоя вес тела человека P полностью распределяется между двумя конечностями. Нагрузка с вертлужной впадины тазобедренной кости передается на головку бедренной кости, которая опирается на большеберцовую кость в коленном суставе и через голеностопный сустав далее на стопу (рис.1).

В нормальном состоянии центры головки бедренной кости, коленного и голеностопного суставов лежат на одной прямой – анатомической

(биомеханической) оси, и нагрузка в суставах распределяется равномерно. При патологических деформациях в костной структуре опорно-двигательного аппарата

коленный сустав смещается с оси, что приводит к перераспределению нагрузки и прогрессированию заболевания. Действие корригирующего ортеза способствует восстановлению анатомической оси, улучшению опороспособности конечностей и уменьшению болевого синдрома у пациента.

Рентгенологическое обследование позволяет с высокой точностью определить величину отклонений сегментов конечности от нормального положения. В ортопедической практике степень коррекции определяется сравнением углов между линиями, проведенными между центрами голеностопного, коленного и бедренного суставов непосредственно на рентгеновском снимке (рис. 2а). При этом для взрослого человека ошибка в определении центров суставов в 1 мм приводит к ошибке угла в 1 град., а максимальная ошибка может доходить до 5 град.

Большей точности определения изменений можно достичь, если использовать компьютерные методы обработки и сравнивать угол непосредственно между сегментами

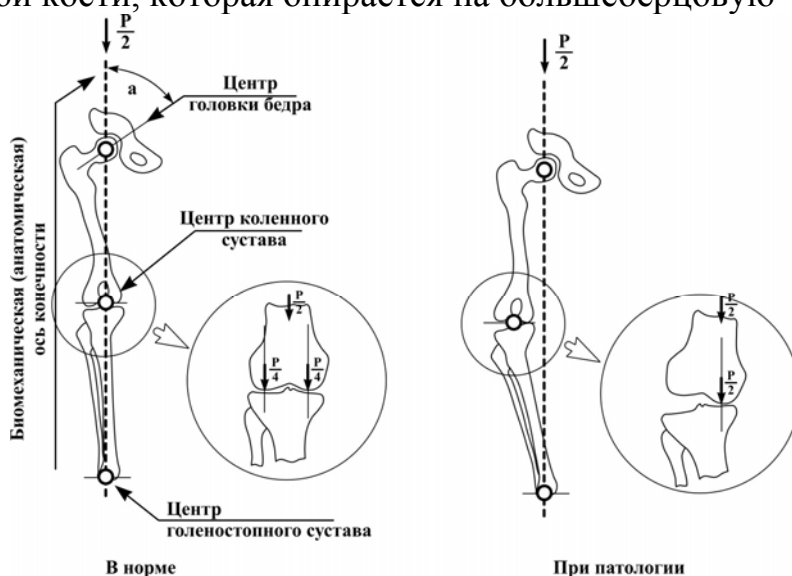


Рис. 1. Биомеханическая ось нижней конечности (P – вес человека)

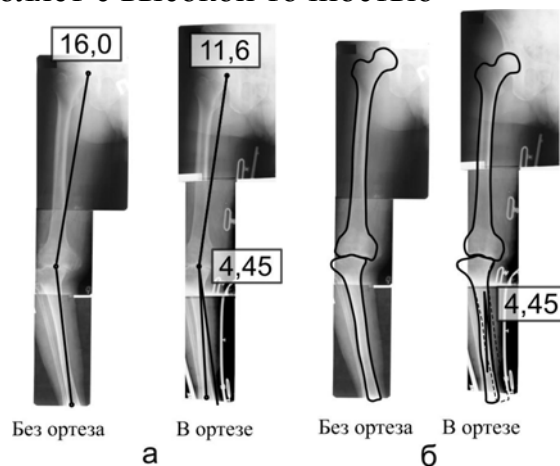


Рис. 2. Определение изменения угла между бедром и голенью во фронтальной плоскости под действием ортеза: а - по центрам суставов ($16,0^\circ$ и $11,6^\circ$ – величины углов между сегментами конечности; $4,45^\circ$ – изменение угла), б - по контуру костей ($4,45^\circ$ – изменение угла)

конечности – бедренной и большеберцовой костями (рис. 2б). Но при этом нельзя получить абсолютных значений угла, не выбрав базовые точки для построения линий. Несмотря на высокую точность, рентгенологический метод контроля действия ортеза на конечность обладает главным недостатком – высокой лучевой нагрузкой на пациента при проецировании всей конечности, и этим объясняются ограничения его применения в ортопедической практике.

Для косвенной оценки результатов ортезирования в мировой практике в настоящее время применяются разнообразные тесты, которые базируются на сравнительной оценке возможностей пациента с использованием ортезных систем и без них. Среди них можно выделить 10mWT, 6MWT, 2MWT, TUG, L-Test of Functional Mobility, Emory Functional Ambulation Profile (mEFAP) и Locomotor Capabilities Index (LCI) [2-7].

Все вышеперечисленные методы являются методами либо субъективной, либо косвенной оценки, но следует отметить, что именно такие методы сейчас наиболее активно используются в клинической практике благодаря их невысокой стоимости и простоте.

Что касается нерентгенологических методов объективной оценки результатов ортезирования, то они мало чем отличаются от хорошо известных методов оценки протезирования с некоторыми доработками, зависящими от характера патологии пациента: опороспособность и устойчивость в положении стоя, а также опорные реакции, кинетика и кинематика ходьбы. Также для нерентгенологического определения положения сегментов конечности в ортопедической практике используются непосредственные измерения при помощи угломера.

Применение объективных методов оценки осложняется тем, что в отличие от протезов, ортезы несут значительно большую функциональную нагрузку, что подчеркивает стандарт ISO 8551. Поэтому метод оценки должен охватывать оценку эффективности использования большей части видов ортезов, и при этом быть доступным и относительно простым в использовании. Таким методом является метод построенный на анализе фото изображений.

3. Метод исследования результатов ортезирования с использованием цифровых фотокамер

Анализ фотоизображения лишен возможности определить непосредственно центр сустава либо положение кости сегмента конечности под мягкими тканями, однако доступны следующие варианты определения взаимного расположения сегментов конечности:

1. Обозначение центров суставов с помощью нанесения маркеров на тело пациента, основанное на мануальных навыках врача.
2. Измерение угла между сегментами конечности по контуру самой конечности.
3. Выделение распознавательных точек на сегментах конечности и построение геометрической схемы по ним на основании фотографии.
4. Визуальное определение осей сегментов.

На рис. 3 приведены примеры описанных вариантов оптических методов и рентгенографического обследования.

Метод с нанесением маркеров на тело конечности связан с определенными трудностями, т.к. сложно точно установить положение центра сустава. Кроме того, маркеры могут смещаться в процессе обследования вместе с кожей и мягкими тканями. Методы, связанные с

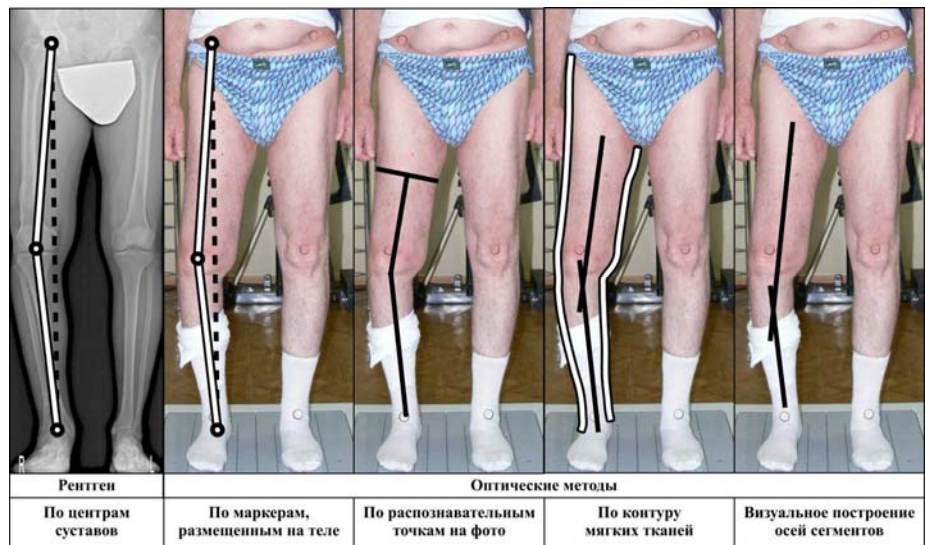


Рис. 3. Варианты измерения угла между сегментами нижней конечности

выделением распознавательных точек, контуров и визуальным построением осей, менее чувствительны к перераспределению мягких тканей, особенно под воздействием ортеза. Измерения проводятся при помощи откалиброванного цифрового фотоаппарата. При этом положение базовой плоскости, в которой проводятся линейные и угловые расчеты, определяется при помощи аппаратно-программного базометрического комплекса [8] (рис. 4).

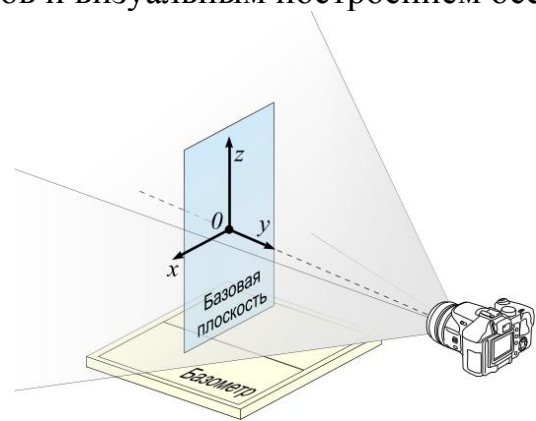


Рис.4. Схема оптических измерений

Объективы недорогих неспециализированных фотокамер имеют существенные оптические искажения [2,3], которые можно компенсировать при помощи математической модели, учитывающей как привязку к контрольным точкам базометрической платформы, фокусное расстояние, так и линейное увеличение и дисторсию третьего порядка объектива.

4. Математическая модель учета оптических искажений объектива

Ключевым моментом фотограмметрических измерений при помощи доступных цифровых камер является точное определение их параметров: фокусного расстояния, дисторсии и пространственной привязки камеры к системе координат объекта.

Положение на снимке произвольной точки А в пространстве с координатами (x, y, z) в системе координат объекта определяется по следующим формулам:

$$\vec{a}^C = \vec{a}^O \cdot M^{O \rightarrow C}, \quad (1)$$

$$\vec{a}^D = \vec{a}^C \cdot \left(b_0 + F_3 \cdot \left| \vec{a}^C \right| \right), \quad (2)$$

где $\vec{a}^O$ – вектор из начала координат в точку А в системе координат объекта;

$\vec{a}^C$ – отображение вектора $\vec{a}^O$ в системе координат камеры;

$M^{O \rightarrow C}$ – матрица перехода и проецирования из системы координат объекта в систему координат камеры;

$\vec{a}^D$ – вектор на плоскости проецирования с учетом дисторсии;

b_0 – коэффициент линейного увеличения;

F_3 – дисторсия третьего порядка.

Решение обратной задачи при известных параметрах объектива и положении камеры позволяет найти пространственные координаты любой точки сфотографированного объекта, находящейся на произвольной плоскости.

Из решения уравнения (2) при известных $\vec{a}^D$, b_0 и F_3 находится неизвестный вектор $\vec{a}^C$:

$$\begin{aligned} R &= |\vec{a}^D|, \quad t_1 = 108 + \sqrt{11664 + \frac{1728 \cdot b_0^3}{F_3 \cdot R^2}}, \\ t_2 &= \frac{\sqrt[3]{t_1 \cdot F_3^2 \cdot R^4}}{6 \cdot F_3 \cdot R^4} - 2 \cdot \frac{b_0}{\sqrt[3]{t_1 \cdot F_3^2 \cdot R^4}}, \quad t_3 = \frac{\sqrt[3]{t_1 \cdot F_3^2 \cdot R^4}}{6 \cdot F_3 \cdot R^4} + 2 \cdot \frac{b_0}{\sqrt[3]{t_1 \cdot F_3^2 \cdot R^4}}, \\ \begin{cases} F_3 \geq 0 & \vec{a}^C = \vec{a}^D \cdot t_2 \\ F_3 < 0 & \vec{a}^C = -\vec{a}^D \cdot \frac{t_2 - i\sqrt{3} \cdot t_3}{2} \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

где R, t_1, t_2, t_3 – промежуточные переменные;

$\vec{a}^C$ – искомый вектор из начала координат камеры в точку на плоскости проецирования;

$\vec{a}^D$ – вектор из центра кадра в точку на снимке.

Точка в пространстве находится как пересечение прямой, направленной из центра камеры по вектору $\vec{a}^C$, и плоскостью, в которой находится искомая точка объекта.

Калибровка камер разбивается на два этапа. На первом определяется фокусное расстояние и дисторсия объектива камеры при помощи специального калибровочного устройства, представляющего собой плоскость с определенным образом нанесенными маркерами. Плоскость устанавливается перпендикулярно оптической оси объектива камеры, фотографируется в трех положениях. На снимках фиксируются координаты маркеров.

Второй этап заключается в определении положения камеры относительно объекта непосредственно перед проведением каждого измерения.

При съемке пациентов в полный рост откалиброванной широкоугольной камерой с матрицей 8 Мп погрешность измерения пространственных координат по всей площади кадра не превысила 2 мм.

5. Примеры практического исследования с использованием цифровых фотокамер с большой дисторсией

В лаборатории биомеханики УкрНИИ протезирования, при помощи разработанного метода оценки результатов ортезирования по фотоизображению, полученному с использованием цифровых фотокамер, было обследовано 95 человек с деформирующим артрозом коленного сустава. Исследования проводились без ортеза и в ортезе (рис. 5).

Использование данного метода дает возможность получить врачу и технику объективную информацию об изменениях линейных и угловых параметров

нижних конечностей при ортезировании больных деформирующим артрозом и определить эффективность применения технического средства реабилитации.

При этом погрешность измерения изменения углов искривления коленных суставов с помощью рентгена и по предложенной методике, по своим значениям

отличаются незначительно. Но, учитывая негативное влияние лучевой нагрузки при рентгенодиагностике, более целесообразно применять методику оценки геометрических параметров нижних конечностей по фотоизображению при ортезировании больных

деформирующим артрозом коленных суставов.

Выводы

Применение фотокамер и использование оптических методов измерений геометрических параметров нижних конечностей позволяет с достаточной точностью оценить эффективность действия ортезов при различных патологиях опорно-двигательного аппарата.

Разработанный математический аппарат, учитывающий дисторсию объектива в процессе анализа полученных фотографий, дает возможность получать достаточно точные результаты при использовании простых неспециализированных камер и объективов, что значительно снижает стоимость всей измерительной системы.

Список литературы: 1. ISO 8551. Протезирование и ортезирование - Функциональные недостатки - Описание человека, которого лечат с помощью ортеза, клинические цели лечения и функциональные требования к ортезу. -с.10.- 2003-08-15. 2. Гельман Р.Н., Дуниц А.Л. Лабораторная калибровка цифровых камер с большой дисторсией // Геодезия и картография. – 2002. - №7. – С. 23 – 31. 3. Курков В., Чекурин А. Цифровые технологии в ближней фотограмметрии, // САПР и графика. – 2000 - №8. 4. Stevens P. Clinically Relevant Outcome Measures in Orthotics and Prosthetics / K.Susan // Clinically Relevant Outcome Measures in O&P.- February 2009. 5. Geboers J. Ankle-foot orthosis has limited effect on walking test parameters among patients with peripheral ankle dorsiflexor paresis/ W. Wetzelaer, H. Seelen, F. Spaans, M. Drost // J Rehabil Med. -2002. - №34. –P. 80-85. 6. Brooks D. The 2-minute walk test as a measure of functional improvement in persons with lower limb amputation / J.Parsons, J.Hunter, M. Devlin, J. Walker // Arch Phys Med Rehabil. -2001. -№82. -P.1478-1483. 7. Brooks D. Reliability of the two-minute walk test in individuals with transtibial amputation / J.Hunter, J.Parsons, E.Livsey, J.Quirt, M.Devlin // Arch Phys Med Rehabil. -2002. -№83. -P.1562-1565. 8. Пат. № 54139 А, Україна, МПК А61В5/103. Пристій для оцінки стійкості і опороздатності людини / Салєєва А.Д., Качер В.С., Гадацький О.В., Ковалько М.Т., Роман Л.К., Василенко І.М., Малиняк М.І., Рибка Є.В.; Науково-дослідний інститут протезування, протезобудування та відновлення працездатності - №2002054224; Заявл.23.05.02; публ.; Промислова власність. Офіційний бюлетень. 2003. -№ 2.

Поступила в редколлегию 11.06.2012

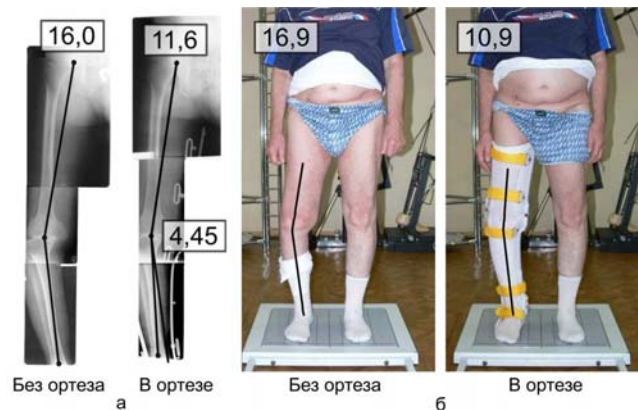


Рис.5. Определение углов искривления нижней конечности пациента С-ко В.М. с правосторонним деформирующим варусным артрозом коленного сустава с помощью: а - рентгена, б - фотоизображения

А.М. КОТЕНКО, докт. техн. наук., проф., УкрДАЗТ, Харків,
П.С. ШИЛАЄВ, асис., УкрДАЗТ, Харків,
А.В. СВІТЛИЧНА, асп., УкрДАЗТ, Харків

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОНТРЕЙЛЕРНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ВАНТАЖІВ

В статті проведено аналіз існуючих технологій, зроблені висновки, та запропоновані заходи щодо організації регулярного міжнародного сполучення на основі контрейлерних технологій.

Ключові слова: контрейлерні перевезення, пристрій для горизонтального накочування, вантажний модуль, графік станів, диференціальні рівняння.

В статье проведен анализ существующих технологий, сделаны выводы и предложены меры для организации международного сообщения на основе контрейлерных технологий.

Ключевые слова: контрейлерные перевозки, устройство для горизонтального накатывания, грузовой модуль граф состояний, дифференциальные уравнения.

This article analyzes existing technologies of piggyback, the conclusions have been made and the arrangements have been proposed for the regular international connections on the basis technology piggyback.

Keywords: piggyback, device for horizontal rolling, cargo module, differential equations, state graph.

Вступ і актуальність.

В Україні транспортна діяльність робить суттєвий внесок у створення валової доданої вартості (ВДВ) – за даними Державної служби статистики України, її частка становить 13 %, а вартість основних засобів виробництва (за первинною оцінкою) – 35 % від загальної вартості виробничого потенціалу країни, середньооблікова кількість штатних працівників галузі складає понад 935 тис. осіб. Комплексні заходи щодо розвитку транспортної галузі є стратегічно важливими і передбачають реалізацію інфраструктурних і транспортних проектів, які забезпечували б ефективніше сполучення між Європою та Азією територією України. [10]

Значна частина наявного потенціалу транспортної галузі задіяна у виконанні транзитних перевезень з використанням вигідного географічного розташування країни та проходженням її територією міжнародних транспортних коридорів.

Останнім часом контрейлерні перевезення стають найважливішим напрямом поліпшення взаємодії залізничного і автомобільного транспорту. Саме поєднання кращих якостей цих видів транспорту дозволять збільшити обсяги регулярних контрейлерних перевезень як у внутрішньому та і зовнішньому сполученні завдяки покращенню транспортного обслуговування вантажовласників, забезпеченню надійності, схоронності вантажу протягом всього маршруту прямування вантажів, а також швидкому проходженню митних кордонів в різних країнах. Але існує ряд питань, які необхідно вирішити для забезпечення регулярного міжнародного сполучення на основі контрейлерних технологій.

Аналізуючи найважливіші тенденції розвитку контрейлерних перевезень у світі, а також з урахуванням досвіду, який мають українські залізниці виникає необхідність визначення технології організації контрейлерних перевезень.

Метою роботи є обґрунтування та створення ефективної технології організації регулярних міжнародних контрейлерних перевезень, на основі математичного моделювання, побудова графів станів та диференційних рівнянь, виявлення переваг та недоліків організації контрейлерних перевезень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У різні роки питанням розвитку контрейлерних перевезень присвячені наукові дослідження таких учених як Т.В.Бутько, М.І.Данько, Ю.В.Дьомін, А.М.Котенко, Г.М.Кірпа, Д.В.Ломотько і інші.[4,6,9]. На даний час в Україні та закордоном виконуються ряд досліджень пов'язаних з організацією контрейлерних перевезень, а саме розробкою спеціального рухомого складу та термінальних технологій, проходженню митних кордонів.

Виклад основного матеріалу

При розробці технології регулярного міжнародного сполучення із застосуванням комбінованого транспорту розглянуті питання пов'язані з технологією перевезення; проходження митних процедур; вимоги щодо конструкції рухомого складу (автомобільного та залізничного транспорту) та вписування його в габарит, також враховані основні особливості при побудові вантажно-розвантажувальних терміналів та технологію роботи. Дослідження пов'язані з організацією контрейлерних перевезень враховують перспективи зростання маси та розмірів автотранспортних засобів і вплив на технічні засоби залізниць та терміналів.

Системні рішення, виходячи з аналізу світового досвіду, важливіших тенденцій розвитку цільового ринку, а також з обліком результатів проведення серії експериментальних поїздок, визначають полігон курсування регулярних контрейлерних потягів з відповідною класифікацією маршрутів, вимоги до рухомого складу та нових технологій, модель взаємодії учасників проекту, перелік основних нормативних документів і інше.

Як відомо, контрейлерні перевезення – це перевезення по визначених маршрутах автопоїздів, автомобілів, автопричепів, напівпричепів, знімних автомобільних кузовів (в навантаженому або порожньому стані) завантажених одним відправником на станції відправлення на адресу одного одержувача на одну або декілька станцій призначення без переробки на шляху прямування на сортувальних станціях. Розрізняють два основних види контрейлерних перевезень: з супроводом, коли при перевезенні транспортного засобу водій прямує разом з ним в окремому пасажирському вагоні; без супроводу, до яких відносяться перевезення контейнерів, знімних кузовів, причепів та напівпричепів.

Ефективність перевезень за другим варіантом значно вище ніж за першим, але у цьому разі тягачами і водіями, а також облаштованими об'єктами інфраструктури для накопичення і збереження напівпричепів мають бути забезпечені станції відправлення і отримання потягів.

На даний момент однією з важливих передумов впровадження контрейлерних перевезень є складна ситуація з проходженням митних процедур,

пов'язаних з обмеженою пропускною спроможністю прикордонних переходів, а також екологічною проблемою.

За даними латвійської Асоціації автоперевезень в 2011р.середній час очікування митних процедур для автомобільних перевізників займав 40 годин. В той же час Асоціація європейських інтермодальних перевезень визнала поїзд комбінованих перевезень «Вікінг» найкращим європейським проектом 2009 року за проходження білорусько-литовської границі протягом 30 хв.

В таблиці [1] представлені дані Всесвітнього банку про часові витрати вантажовласників на проходження митних процедур в різних країнах світу.

Таблиця - Порівняння часу на проведення митних процедур

№ п/п	Держава	Митні процедури			
		Процедура митного очищення		Митний огляд,%	
		Без огляду	З оглядом	Всього	Повторний огляд
1	Латвія	0.40	0.79	1	2
2	Білорусь	1	3	35	18
3	Україна	1.26	2.52	51	8
4	Німеччина	0.71	1.57	3	5
5	Польща	0.79	1.42	5	3
6	Китай	1.7	3.38	9	2
7	США	2.87	1.5	49	4
8	Казахстан	1.62	1.74	42	21
9	Російська федерація	2.57	4.62	44	10

Важливим є той факт, що порівняння діючих в Європі та просторі габаритних обмежень свідчить, що в межах «простору 1520мм і 1435мм» існує більш сприятлива ситуація для реалізації контейнерних технологій, що дозволяє застосовувати більш прості і технологічні конструкторські рішення, перш за все при розробці рухомого складу.

Можливість використання накопиченого у світовій практиці досвіду в сумі зі сприятливими умовами становить високий потенціал впровадження контейнерних технологій в Україні

Сьогодні постає проблема прискореного переходу вагонами міжнародних стиків залізниць колії 1520/1435 мм. Технологія без перевантажувальних перевезень є актуальним питанням у зв'язку з необхідністю транспортування екологічно небезпечних вантажів комбінованим транспортом, які не підлягають перевантаженню. В даний час у світовій практиці набули поширення такі технології, як «Ро-ла» (RollendeLandstrasse - рухома дорога), «Модалор» (Modalohr), piggyback (перевезення напівпричепів без тягачів), а також відправки в вагонах кошикового типу. В Україні застосовується спосіб з використанням торцевої рампи. Ця технологія полягає в заїзді машини з напівпричепом або автопоїздом самоходом з торця вагона по торцевій рампі або через підвищений майданчик. При масових перевезеннях, завантаження представляє собою

наскрізний проїзд по всьому рухомому складу. Машини рухаються одна за одною, поступово заповнюючи платформи. Таким чином, перший автопоїзд або тягач з напівпричепом, проїжджаючи до останнього вагона, закріплюють на ньому і при розвантаженні він опиняється, навпаки, останнім.

При виборі технології, для використання в Україні та в Європі враховуються такі вимоги: можливість швидкого переходу поїздом стиків при різній ширині колії; скорочення часу для навантаження та розвантаження рухомого складу; також відносно низькі витрати для її побудови та будівництва терміналів.

Найбільш відомою технологією перевезення вантажних автомобілів і напівпричепів в країнах Європи є система Modalohr. Такий метод передбачає горизонтальне навантаження і вивантаження з бічним в'їздом і виїздом для одночасної і швидкої обробки декількох автотранспортних засобів; низький рівень вантажного майданчика для вписування автотранспортних засобів заввишки до 4 м в існуючий габарит рухомого складу. Тягач і напівпричіп автопоїзда перевозять в розчепленому стані із-за обмеження по вписуванню в криві; їх розміщення між візками в зчепленому стані неможливе також із-за обмеження по довжині платформи. Принцип системи Modalohr полягає в тому, що на кожному вагоні можна перевозити один автомобіль, або напівпричіп, або два тягачі. Але недоліком цього способу являється складність конструкції платформи, неможливість виконання вантажних операцій з платформи різної висоти рівня підлоги, а також потрібно будівництво залізобетонних естакад за кількістю завантажених платформ. [3]

Відомі на сьогодні технології не можуть бути використані як загальносистімова модель на «просторі 1520мм і 1435мм» із-за своїх конструкційних особливостей, не відповідних специфіці експлуатації парку рухомого складу на мережі українських залізниць, особливостей кліматичних умов або цінових характеристик. Однією з особливостей Російської концепції організації контрейлерних перевезень «на просторі 1520» [1] є система «рухомий склад – термінали», яка утворює єдиний горизонтальний майданчик для руху автопоїзду в довільному напрямку. Це дає можливість:

обмежитись на вантажних операціях без застосування підйомно-транспортного устаткування; значно скоротити час на виконання навантажувально-розвантажувальних операцій за рахунок їх здійснення за допомогою бічних рамп з обох сторін контрейлерного поїзду; здійснювати самохідне навантаження та розвантаження автопоїздів на платформи контрейлерного поїзду.

Недоліком такої системи є високий рівень капітальних витрат на будівництво контрейлерних терміналів (будівництво одного типового контрейлерного терміналу – 770746,262тис.грн) [1], відносно низька ступінь завантаження терміналів; тривалий термін реалізації проекту, перспектива розрахунків – 32 роки [1]; при побудові зниженої колії на терміналі виникає велика залежність від гідрогеологічної ситуації, яка може відрізнятись від регіону та місця розташування, у зв'язку з цим, можливе створення додаткових конструкцій, що тягне за собою більші капітальні витрати. Не повністю враховані проміжки між

платформою та естакадою, при заїзді на платформу великотоннажної вантажівки, може виникнути зміщення платформи від горизонтальної вісі в сторону.

Цільова функція вибору раціональної технології контрейлерних перевезень вантажів має вигляд:

$$\sum_{i=1}^A W = E + F + G + H + N \rightarrow \min \quad (1)$$

де E –витрати на доставляння вантажного модуля від вантажовідправника до вантажної станції, грн.; F –витрати на перевантажувальні операції, на станції відправлення та призначення, грн.; G –витрати на доставляння вантажу між магістральними станціями, грн.; N – витрати на зміну міжколійної відстані на прикордонній станції; H –витрати на доставляння вантажного модуля від станції призначення до вантажоодержувача, грн.

Обмеження при перевезенні вантажів контрейлерним способом:

$$\left. \begin{aligned} T_{\text{дост}} &\leq T_{\text{норм}}; \\ \Delta K &\leq \Delta C; \\ P_{\text{вм}} &\leq P_{\text{тр.з}}; \\ Z_{\text{min}} &\leq Z \leq Z_{\text{max}}; \\ t_{\text{min}} &\leq t \leq t_{\text{max}}; \end{aligned} \right\}$$

де $T_{\text{дост}}$ – фактичний строк доставки вантажу, доба; $T_{\text{норм}}$ – нормативний строк доставки вантажу, доба; ΔK – додаткові капітальні витрати на заходи по підвищенню ефективності перевезень, грн; $P_{\text{вм}}$ – маса вантажного модуля, т; ΔC – прибуток від запровадження нових технологій, грн.; $P_{\text{тр.з}}$ – вантажопідйомність залізничного транспортного засобу, т; Z – кількість вантажно-розвантажувальних машин; t – час роботи вантажного фронту протягом доби, год.

Загальна схема ресурсозбереження при контрейлерних перевезеннях вантажів:

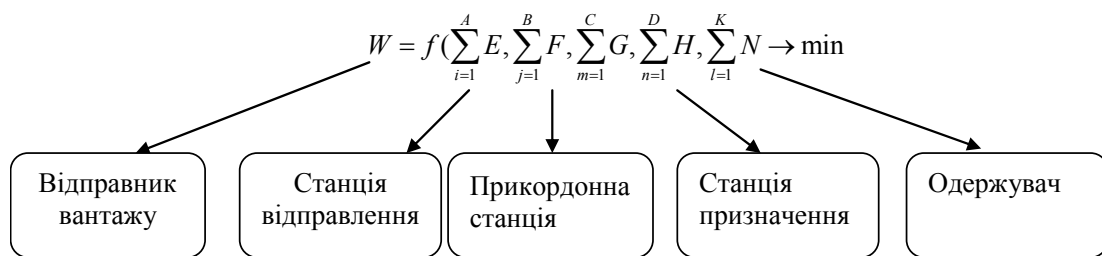


Рис.1. Загальна схема ресурсозбереження при контрейлерних перевезеннях вантажів

Вибір раціональної технології контрейлерних перевезень виконується за цільовою функцією, що наведено на рис.1.

Ефективність запровадження технологій контрейлерних перевезень для транспортного напрямку може бути визначена як[2]:

$$\Delta \Pi = \sum_{i=1}^m [\lambda (K_a L - n K_k) + (C_1 - C_2) N], \quad (3)$$

де K_a – вартість побудови 1 км автошляхів, що відповідає Європейським стандартам, грн.; L – протяжність транспортного напрямку, км; K_k – вартість побудови одного пристрою для горизонтального накочування вантажних модулів (напівпричепів, причепів, тягачів) (80.0-90.0 тис.грн.) грн.; n – кількість пристроїв для горизонтального накочування, що планується встановити на транспортному напрямку; C_1 – витрати, що пов’язані з однією відправкою автотранспортом, грн.; C_2 – експлуатаційні витрати, що пов’язані з відправкою залізницею; N – кількість відправок за рік, од.; γ – коефіцієнт, що враховує річні капітальні витрати на запровадження контрейлерних технологій

Математична модель руху контрейлерного поїзда у вигляді графа станів представлена на рис.2:

Система диференціальних рівнянь Колмогорова для графа рис.2 представлені у виразі:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_1}{dt} &= -(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14} + \lambda_{15})P_1 + \lambda_{21}P_2 + \lambda_{31}P_3 + \lambda_{41}P_4 + \lambda_{51}P_5 \\ \frac{dP_2}{dt} &= \lambda_{12}P_1 - \lambda_{21}P_2 \\ \frac{dP_3}{dt} &= \lambda_{13}P_1 - \lambda_{31}P_3 \\ \frac{dP_4}{dt} &= \lambda_{14}P_1 - \lambda_{41}P_4 \\ \frac{dP_5}{dt} &= \lambda_{15}P_1 - P_5(\lambda_{51} + \lambda_{56}) + \lambda_{65}P_6 \\ \frac{dP_6}{dt} &= \lambda_{56}P_5 - \lambda_{65}P_6 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Нормувальна умова:

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 = 1 \quad (5)$$

Вірогідності станів руху контрейлерного поїзда в залежності від часу наведені на рис. 4.

На рис.5 наведені річні експлуатаційні витрати при різних варіантах виконання контрейлерних перевезень вантажів.

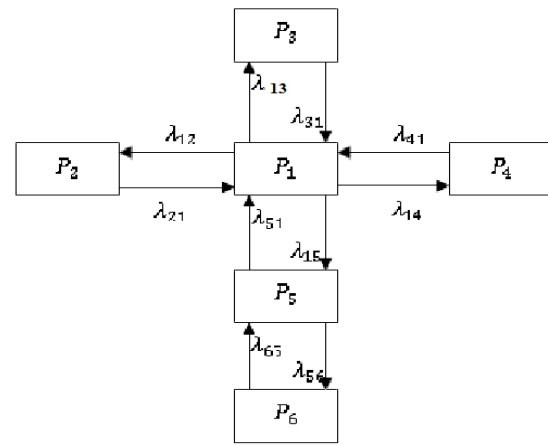


Рис. 2. Граф станів руху контрейлерного поїзда: P_1 – вірогідність руху контрейлерного поїзда P_2 – вірогідність знаходження контрейлерного поїзда під розвантаженням; P_3 – вірогідність знаходження контрейлерного поїзда під навантаженням; P_4 – вірогідність знаходження контрейлерного поїзда на технічній станції; P_5 – вірогідність знаходження контрейлерного поїзда під зміною між колійною відстані візка; P_6 – вірогідність знаходження контрейлерного поїзда на прикордонній передавальній станції.

Згідно з рис.5 найбільш ефективним є варіант перевезень вантажів із застосуванням технології, що включає пристрій для горизонтального накочування.

В УкрДАЗТ на кафедрі управління вантажною і комерційною роботою, розроблена технологія для горизонтального накочування автопричепів, напівпричепів, знімних автомобільних кузовів.

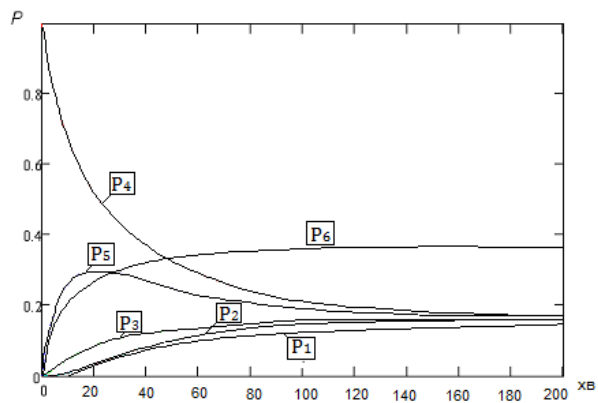


Рис.4. Вірогідності станів руху контрейлерного поїзда в залежності від часу

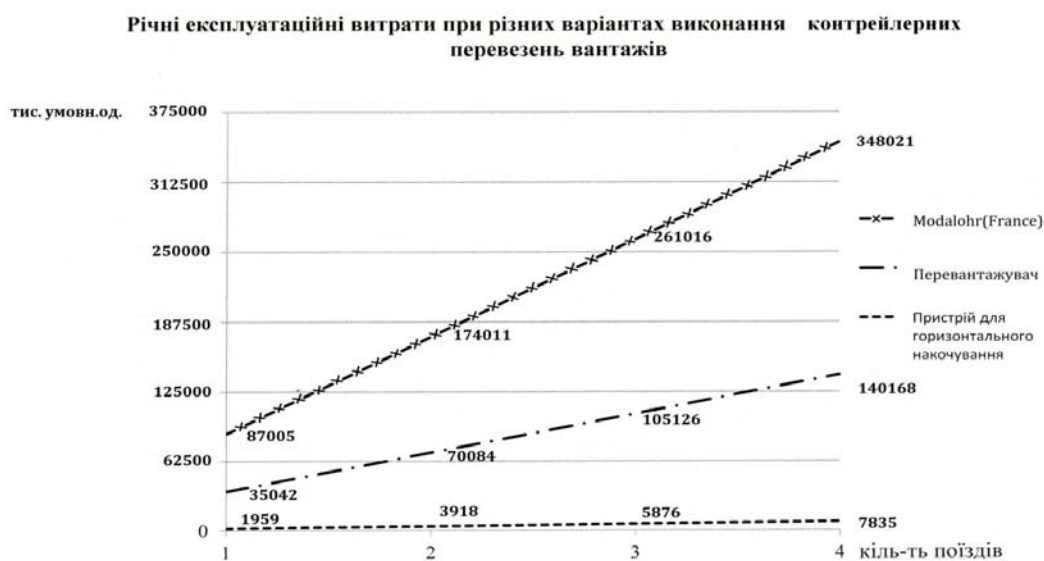


Рис.5. Річні експлуатаційні витрати при різних варіантах виконання контрейлерних перевезень

Спосіб наведено на рис.6. Прибулі вантажні модулі на залізничних платформах подаються на колію розвантаження. Після встановлення платформи 1 з вантажним модулем, платформа опускається механізмами 3 до рівня шляхового покриття.

Після опускання механізм повертання 8 повертає платформу 1, навколо вісі 2, на кут, потрібний для з'їзду вантажного модуля із залізничної платформи. Після з'їзду вантажного модуля, розвантажена платформа 1 повертається у зворотному напрямку механізмом 8. Потім механізмами 3 піднімається до рівня головок рейок. Повертання платформи виконується на опорних поверхнях 4, на катках 5. Зміна між колійної відстані, при подаванні на пристрій платформ з різною колією, виконується механізмами 7. Спосіб дозволяє виконувати вантажні операції із залізничними платформами різної висоти підлоги від рівня головок рейок та платформ з різною величиною міжрейкової колії. На платформи можуть завантажуватись вертикальним способом також великотоннажні контейнери. При

розробці даної системи були враховані недоліки існуючих технологій та особливості розвитку контрейлерних перевезень. В майбутньому запропонована технологія сприятиме організації регулярного міжнародного сполучення між Україною і країнами Європи. Розроблена технологія захищена Патентом України та враховує: тенденції інтеграції транспортних систем, параметри використовуваної техніки і тари, застосовувані технології і можливості інфраструктури і т.п.; необхідність забезпечення максимальної швидкості термінальної обробки, високу якість послуг, мінімізацію витрат, забезпечення збереження вантажу і т. п.; забезпечення перевезення великотоннажних контейнерів.

Дана технологія забезпечує: підвищення ефективності транспортної системи за рахунок збільшення швидкості проходження вантажів; прискорення процесів інтеграції в світову економічну і транспортну системи; зниження навантаження на ділянки автомагістралей і вулично-дорожньої мережі крупних міст з найбільш інтенсивним рухом; зниження навантаження на екосистему; розвиток національного ринку логістичних послуг; підвищення конкурентоспроможності залізниці, збільшення масштабів перевізної діяльності, одержання додаткових прибутків; підвищення ефективності інвестиційної діяльності;

В використанні контрейлерних технологій за умовою регулярності відправок, можуть бути зацікавлені, в першу чергу власники швидкопсувних, сезонних, цінних та небезпечних вантажів, так як, пріоритетом є фактори швидкості, пунктуальності, надійності та безпеки перевезень.

Найбільший потенціал для організації контрейлерних перевезень складають більш завантажені автотранспортні напрямки. Відповідно вибір оптимальних контрейлерних маршрутів повинен базуватися на аналізі існуючої інтенсивності руху з урахуванням перспектив зміни дорожньої ситуації.

Висновок

Розглянуті головні тенденції в розвитку контрейлерних перевезень. Запропонована технологія для експлуатації на залізницях як колії 1520 мм, так і колії 1435 мм, викладені вимоги щодо рухомого складу необхідного для комбінованих перевезень. Реалізація регулярного контрейлерного сполучення забезпечить розвиток мережі існуючих транспортних коридорів, інтеграцію транспортної інфраструктури України до світової транспортної системи, а також значно збільшить обсяги перевезень її територією за участю національних транспортних компаній, сприяючи підвищенню конкурентоспроможності країни на світовому ринку транспортних послуг.

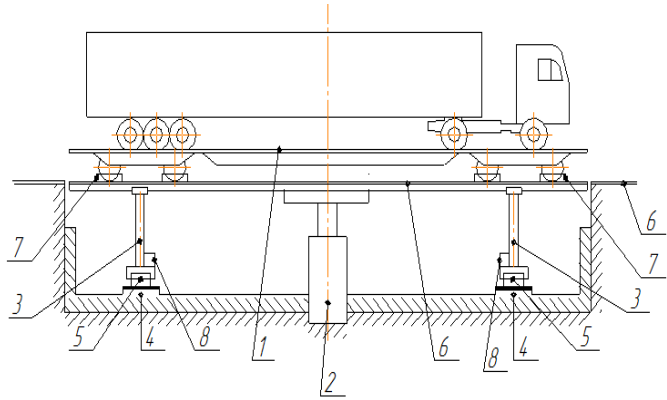


Рис.6. Виконання способу навантаження напівпричепів, причепів, вантажних модулів на залізничні платформи за допомогою пристрою для горизонтального накочування

Список літератури: 1. Концепция организации контрейлерных перевозок «на пространстве 1520». – 2011г. 2. *Шилаев П.С.* Підвищення ефективності процесу інтероперабельних перевезень вантажів на основі ресурсозберігаючих технологій. // *Шилаев П.С.* // Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. – 2012р. 3. Modalohr — система перевозки автотранспортных средств. // Железные дороги мира. – 2002. – №10. 4. *Котенко А.М.* Інтермодальні перевезення. Перспективи розвитку / *Котенко А.М., Шилаев П.С.* // 36. наук. праць. – Харків УкрДАЗТ. – 2009. – вип.54. – с.31-36. 5. Информационно-деловой журнал «Столичный экспресс». – 2010г. – Одеса. – с.2-22. 6. *М.Д.Костюк.* Техніко-технологічне забезпечення інтермодальних та інтероперабельних перевезень / *М.Д.Костюк, Ю.В.Дьомін* // Залізничний транспорт України. – 2009. – №3. 7. *Кирилова, А.Г.* Новые технологии перевозок – контрейлерные поезда. Европейские реалии и российские перспективы / *Кирилова, А.Г.* // Транспорт: наука, техника, управление. – 2010. – № 7. – С. 25-28. 8. Состояние и перспективы развития мультимодальных (комбинированных) перевозок в Украине // Транспорт. – №7. – 2012г. – с.63-68. 9. *Котенко А.М.* Підвищення ефективності комбінованих перевезень. Удосконалення вантажної і комерційної роботи на залізницях України / *Котенко А.М., Кушнірчук В.Г.* // 36. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ. – 2004. – Вип.62. – с.50-55. 10. Стратегічні напрями розвитку транспортної галузі України у після кризовий період. – К.: НІСД. – 2011. – 48 с. 11. <http://www.uzt.kiev.ua/clients/uzt.nsf/0/7420E4AA076B4F6DC22577D1002E59A1>. 12. Спеціальний випуск Контрейлерные перевозки, ООО «Редакция журнала «РЖД-партнер». – 2012р.

Поступила в редколлегию 11.06.2012

УДК 531.7

Л.А. БОРКОВСКАЯ, доц., «НАУ», Киев,
А.В. БОРКОВСКИЙ, асис., «НАУ», Киев,
О.Ю. БОНДАРЬ, студ., «НАУ», Киев,
Ю.Т. КОБЫЛЕЦКИЙ, студ., «НАУ», Киев

КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА КЛАССИФИКАЦИИ ДЕТАЛЕЙ

У статті розглядаються питання розробки структурної та принципової схеми комп'ютерної системи класифікації деталей. Розглядаються питання поліпшення якості досліджуваних зображень за допомогою медіанної фільтрації і застосуванням лінійного контрастування.

Ключові слова: фільтрація і контрастування зображення, шумопоглинання, білий гауссівський шум, медіанна фільтрація, поріг яскравості.

В статье рассматриваются вопросы разработки структурной и принципиальной схемы компьютерной системы классификации деталей. Рассматриваются вопросы улучшения качества исследуемых изображений с помощью медианной фильтрации и применением линейного контрастирования.

Ключевые слова: фильтрация и контрастирование изображения, шумоподавление, белый гауссовский шум, медианная фильтрация, порог яркости.

Questions of the block-diagram and the principal scheme [designing](#) of the [computer system](#) details classification are considered in the article. Questions of the image data researching quality improvement with the help of median filtration and with the use of linear contrast study are considered.

Keywords: filtering and contrast study of image data, noise quieting, white Gaussian noise, median filtration, threshold of luminance.

Введение

Одним из приоритетных направлений в области бесконтактного определения и измерения параметров объектов является создание телеметрических систем контроля, позволяющих получать изображение измеряемых объектов при помощи видеокамеры и производить их анализ при помощи методов цифровой обработки сигналов, реализованных на базе персонального компьютера.

Повышенные требования к качеству продукции приводят к необходимости разработки современных методов и средств классификации деталей. Внедрение автоматизированных приборов контроля качества, заменяющих визуальную проверку, позволяют снизить процент отбракованной продукции, обеспечивают повышение эффективности контроля. Процесс классификации деталей состоит из последовательности выполнения операций на оцифрованном изображении:

- обнаружение детали, с предварительной обработкой исследуемых изображений с помощью медианной фильтрации и применением линейного контрастирования;
- определение физических характеристик детали (площадь, форма, цвет, местонахождение);
- классификация детали.

Постановка задачи

Основными задачами исследования являются:

- разработка структурной и принципиальной схемы компьютерной системы классификации детали;
- решение задачи обнаружения детали;
- предварительная обработка исследуемых изображений с помощью медианной фильтрации и линейного контрастирования;

Решение задачи

Разработана принципиальная и структурная схемы компьютерной системы классификации

деталей. На рис. 1

показана

принципиальная

схема

компьютерной

системы

классификации

деталей.

Схема

включает в себя

следующие

элементы: блок камеры, блок системы освещения, блок подсистемы захвата кадра, блок процессора, блок дисплея. Блок системы освещения необходим для поддержания уровня яркости; освещения поверхностей, подлежащих инспекции. Полученное изображение передается в блок подсистемы захвата кадра, который служит для перевода аналогового видеосигнала к цифровому виду. Блок процессора выполняет алгоритмы предварительной обработки цифрового изображения – фильтрации и контрастирования; рассчитывает характеристики

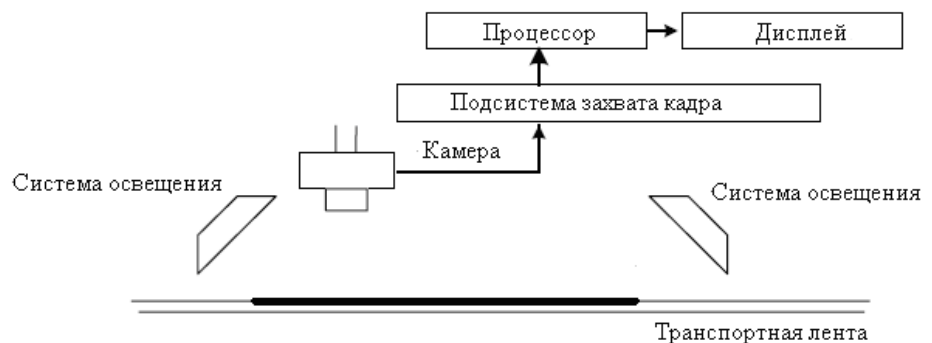


Рис. 1. Принципиальная схема компьютерной системы классификации деталей

детали (площадь, местонахождение); выполняет распознавание детали. Блок дисплея служит для отображения пользователю результатов обнаружения детали.

На рис. 2

показана
структурная
схема
компьютерной
системы
классификации
деталей.

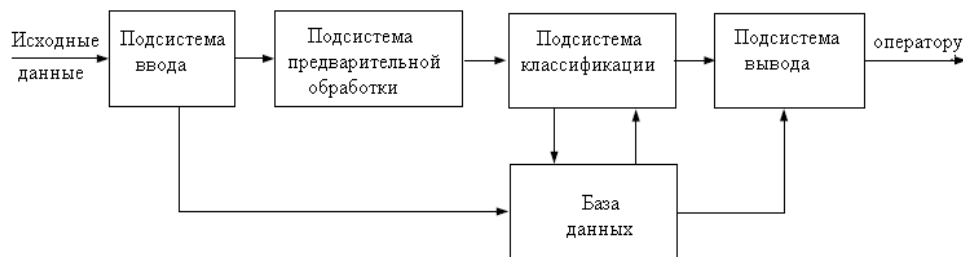


Рис. 2. Структурная схема компьютерной системы деталей

Структурная

схема компьютерной системы классификации деталей разработана для решения следующих задач:

- ввод информации;
- предварительная обработка изображения,
- классификация детали.

Обработка цифрового изображения

Одними из главных и трудноразрешимых до настоящего времени проблем плохого качества изображения являются его зашумленность и низкая контрастность. Источники шума могут быть различными: неидеальное оборудование для захвата изображения; плохие условия съемки - например, сильные шумы, возникающие при плохом освещении; помехи при передаче по аналоговым каналам - наводки от источников электромагнитных полей, собственные шумы активных компонентов (усилителей) линии передачи. Алгоритмы шумоподавления обычно специализируются на подавлении какого-то конкретного вида шума. Не существует пока универсальных фильтров, детектирующих и подавляющих все виды шумов. Однако многие шумы можно довольно хорошо приблизить моделью белого гауссовского шума, поэтому большинство алгоритмов ориентировано на подавление именно этого вида шума. Наиболее приемлемым методом фильтрации гауссовского шума оказалась медианная фильтрация. Для каждого пикселя в некотором его окружении (окне) ищется медианное значение и присваивается этому пикселю. Определение медианного значения: если массив пикселей отсортировать по их значению, медианой будет срединный элемент этого массива. Медиану также можно определить формулой:

$$med = \arg \min \sum_{f_j \in W} |f_i - f_j|, \quad (1)$$

где W - множество пикселей, среди которых ищется медиана, а f_i , f_j - значения яркостей этих пикселей.

Были выполнены машинные эксперименты в среде MATLAB с целью определения эффективности предлагаемого метода фильтрации.

Задача контрастирования связана с улучшением согласования динамического диапазона изображения и экрана, на котором выполняется визуализация. Увеличить контрастность изображения позволяет применение метода линейного контрастирования, когда яркость каждого пикселя

пересчитывается с тем, чтобы диапазон яркостей исходного изображения $[f_{min}, f_{max}]$ растянуть до диапазона яркостей $[g_{min}, g_{max}]$:

$$g = a \cdot f + b, \quad (2)$$

где g - выходная яркость пикселя; f - исходная яркость пикселя; a , b - коэффициенты преобразования. Параметры этого преобразования a , b нетрудно определить, исходя из требуемого изменения динамического диапазона. Если в результате обработки нужно получить шкалу $[g_{min}, g_{max}]$, то

$$a = \frac{g_{max} - g_{min}}{f_{max} - f_{min}}, \quad b = \frac{g_{min}f_{max} - g_{max}f_{min}}{f_{max} - f_{min}}. \quad (3)$$

Были выполнены машинные эксперименты в среде MATLAB с целью определения эффективности предлагаемого метода контрастирования.

Исследование снимков изображений показало, что пиксели детали отличаются от остальной поверхности своими яркостными характеристиками. Поэтому процесс обнаружения деталей связан с вычислением соответствующего значения порога изображения (в градации серого). Этот порог зависит от системы формирования изображения и должен быть настроен в отношении положения камеры и освещения. В работе [3] представлен метод Бернсена. Для каждого пикселя $(x; y)$ выбирается порог яркости:

$$B(x, y) = \frac{B_{max} - B_{min}}{2}, \quad (4)$$

где $\min$, $\max$, B_{max} , B_{min} - соответственно, самый высокий и самый низкий уровень яркости пикселей из квадратной окрестности пикселя $(x; y)$. Если уровень контраста (разность самого высокого уровня и самого низкого уровней) превышает некоторый порог, то пиксель считается либо белым, либо черным. Для всего изображения этот порог контраста является константой и должен подбираться интерактивно.

Выполнены машинные эксперименты с целью определения эффективности предлагаемого метода. В качестве программного пакета была использована среда для анализа, моделирования и проектирования MATLAB.

Выводы

Для решения поставленной задачи была разработана структурная и принципиальная схема компьютерной системы классификации деталей. Реализация предложенного проекта позволит повысить производительность труда, сократить время на обработку информации.

Список литературы: 1. Automatic PCI Inspection Algorithms: A Survey / M. Voganti, F. Ercal, C. Dagli, S. Tsunekawa // Computer Vision and Image Understanding. - № 63. - 1996. - P. 287-313. 2. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход: Пер. с англ. - М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. - 928 с. 3. Гонсалес Р., Вудс Р., «Цифровая обработка изображений», 2005. - 1072с. 4. Методы компьютерной обработки изображений / Под. ред. В.А. Сойфера. - М.: Физматлит, 2003. - 784 с. 5. Борковський О.В. Комп'ютеризована система обробки відеозображень при вимірюванні деталей / О.В. Борковський, Л.В. Коломієць // Вісник Інженерної академії України. - 2008. - № 1. - С. 74-78.

Поступила в редколлегию 15.06.2012

С.В. ІЛЬІН, асп., ЗДІА, Запоріжжя

СПОСОБИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ВІДВОДУ ТЕПЛОТИ ВІД КОТУШОК ДИСКОВИХ ОБМОТОКОК ТРАНСФОРМАТОРА

В статті представлені результати чисельного моделювання течії мастила в радіальному каналі шириною в 1 мм. Приведено результати дослідження полів швидкостей течії мастила в радіальних каналах та температур в моделі обмотки.

Ключові слова: чисельне моделювання, радіальний (горизонтальний) мастильний канал, поля температур і швидкостей.

В статье представлены результаты численного моделирования течения масла в радиальном канале шириной в 1 мм. Приведены результаты исследования полей скоростей течения масла в радиальных каналах и температур в модели обмотки.

Ключевые слова: численное моделирование, радиальный (горизонтальной) смазочный канал, поля температур и скоростей.

The paper presents the results of numerical modeling of oil leaks in the radial channel width of 1 mm. The results of studies of velocity fields in the radial leakage of oil channels and temperatures in the model winding.

Keywords: numerical modeling, radial (horizontal) lubricant channel temperature and velocity fields.

1. Вступ

На сьогоднішній день в трансформаторобудуванні застосовуються електричні машини з шириною горизонтального каналу обмоток більше 3 мм. Проте, для зниження матеріалоємності процесу створення трансформатора необхідно зменшувати його габаритні розміри. Новаторською є пропозиція сконструювати трансформатор з шириною горизонтального каналу близько 1 мм. Але в такому разі виникає проблема відводу тепла від обмоток трансформатору.

Температура в машині не повинна перевищувати нормованої величини, а для того, щоб не виходити за її межі, необхідно утримувати на відповідно низькому рівні величину питомого теплового потоку, що при зростаючих лінійних розмірах, які характеризуються радіусом r , відповідно до вищенаведених розумінь, є досяжним тільки шляхом зниження питомих витрат на одиницю об'єму q . Як відомо, це зниження витрат обумовлюється зменшенням електромагнітних навантажень, тобто щільності чи магнітної індукції, і спричиняє збільшення питомих витрат матеріалів, таким чином, збільшення розмірів машин приводить до збільшення вартості матеріалів на одиницю потужності. Щоб уникнути цього чи, іншими словами, для збереження величини q незмінної при зростаючих розмірах електричних машин необхідно збільшувати охолодні поверхні, як шляхом підрозділу тіл, що виділяють тепло, так і за допомогою розміщення додаткових охолоджуючих поверхонь. Іншим способом

зменшення температури активної частини трансформатора є збільшення швидкості циркуляції охолоджуючої рідини.

Проблемам охолодження силових трансформаторів присвячена велика кількість публікацій. Фундаментальний підхід до вирішення проблем проектування та експлуатації трансформаторів представлений в роботах [1] та [2]. Проте, в усіх цих роботах приведені дослідження процесів відводу теплоти від трансформаторних обмоток з шириною радіального каналу не менше 3 мм.

2. Постановка задачі та основні рівняння

Для дослідження розподілу швидкостей мастила методом чисельного моделювання була створена чисельна модель обмотки трансформатора.

Геометричні параметри моделі, що досліджується, наведено на рис.1, де 1 – мідь котушок, 2 – вертикальний канал, який заповнено трансформаторним мастилом, 3 – горизонтальний (радіальний) канал, який досліджується, 4 – трансформаторний картон, 5 – стінка баку трансформатора. Висота горизонтального каналу складає 1мм, радіальна ширина котушки – 50

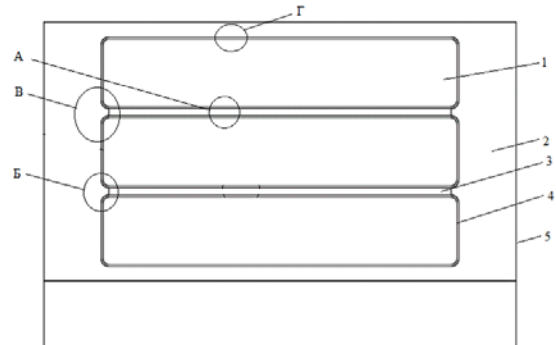


Рис.1. Геометричні параметри моделі

мм, висота котушки – 10 мм, ширина вертикального каналу складає 10 мм, товщина картону – 0,1 мм. Площа поверхні кожної котушки дорівнює 500 мм². Швидкість на поверхнях котушок моделі дорівнює 0 м/с (імітація стінок котушок). На стінки котушок прикладено навантаження у вигляді щільності теплового потоку 3500 Вт/м² [3]. Початкова температура мастила на вході в модель складає 60⁰С. Температура навколишнього середовища - 30⁰С. Теплофізичні властивості матеріалів прийняті відповідно до експериментальних даних, що приведені в роботі [1]. Для дослідження теплових та гідродинамічних процесів в обмотках трансформатора обрано циліндричну систему координат (довільна крапка має координати $P(x,r,\varphi)$). Система координат обрана таким чином, що координатна вісь ОХ направлена вертикально вверх.

Таким чином розкладання вектора прискорення вільного падіння у вибраній координатній системі буде мати вигляд:

$$g_{Ox}=-g; \quad g_r=0; \quad g_\varphi=0, \quad (1)$$

де g – чисельне значення вектора прискорення вільного падіння.

Щільність теплового потоку на поверхні твердого тіла (границя «мастило – поверхня котушки») пропорційна температурному градієнту поверхні. Цю залежність представлено у виді закону Фур'є:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}t, \quad (2)$$

де λ - питома теплопровідність провідника, Вт/(м К), t – температура поверхні провідника, К.

За умови наявності в системі внутрішніх джерел теплоти закон збереження енергії, який дає залежність між щільністю внутрішніх теплових джерел та кількістю теплоти, яка виділяється через поверхню, має вигляд:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{\partial t}{r \cdot \partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{q_v}{\lambda} = 0. \quad (3)$$

де q_v - середня щільність теплових втрат в об'ємі провідника, Вт/м³.

Рівняння (3) є законом Пуассона в циліндричній системі координат. Диференційне рівняння теплопровідності має вигляд (3) при дослідженні теплових процесів, що мають місце в провідниках, в яких є внутрішні джерела виділення теплоти.

При дослідженні температурного поля трансформаторного мастила вважається, що середовище є суцільним. Стан суцільного середовища характеризується макроскопічними параметрами: швидкістю, температурою та тиском. Для визначення цих параметрів, розглянемо основні рівняння, які описують теплообмін в рідині.

Рівняння енергії рідини, яка рухається в циліндричній системі координат має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} + W_x \frac{\partial t}{\partial x} + W_r \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{W_\varphi}{r} \frac{\partial t}{\partial \varphi} = \\ = \frac{1}{\rho c_p} \cdot \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right) + \frac{\lambda \cdot \partial t}{r \cdot \partial r} \right) + \frac{q_v}{\rho c_p}, \end{aligned} \quad (4)$$

де W - швидкість течії рідини, м/с, ρ - щільність рідини, кг/м³, c_p - теплоємність рідини, Дж/(кг·К).

За умови стаціонарного теплообміну похідні часу стають рівними нулю.

3.Результати розрахунків та їх аналіз

Кількість теплоти, яка передається від міді котушок трансформаторному мастилу в радіальному каналі є незначною [4]. Єдиним шляхом для інтенсифікації теплообміну є збільшення чисельних значень локальних коефіцієнтів тепловіддачі за рахунок збільшення швидкості течії мастила в радіальному каналі. Для аналізу залежності тепловіддачі з поверхні котушок від швидкості течії мастила в радіальному каналі, задамося швидкістю мастила на вході в канал 0,5м/с. У випадку, що розглядається (рис. 1), було обрано, що швидкість прикладається до входу в радіальний канал (на рис. 1 в правій частині рисунка), уздовж вісі ОХ. Результати розрахунків моделі відображені на рис. 2 та 3.

З рис. 2 видно, що швидкість мастила на вході в радіальний канал дійсно складає 0,5 м/с, але навіть цієї швидкості недостатньо для того, щоб проштовхнути весь об'єм мастила по радіальному каналу. Про це можна стверджувати виходячи з наявності застійних зон в лівій частині радіальних каналів.

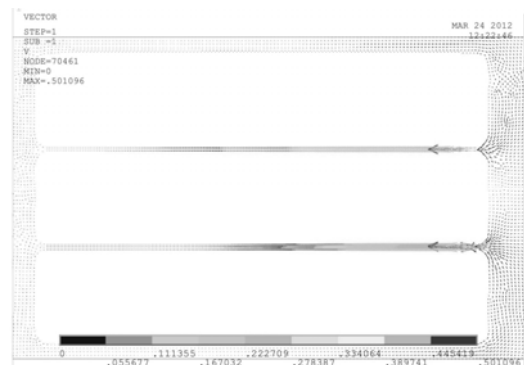


Рис. 2. Розподіл швидкостей мастила в каналах трансформатора при заданій швидкості на вході в радіальний канал

Збільшення швидкості мастила на вході в радіальний канал призведе до

суттєвого зростання (понад в 100 разів) чисельних значень локальних коефіцієнтів тепловіддачі від котушок трансформатора. Збільшення швидкості течії мастила в радіальних каналах призведе до зростання інтенсивності теплообміну між міддю та мастилом. В результаті, температура міді значно знизиться (рис.3) порівняно зі значеннями температури при природній циркуляції охолоджуючого середовища [4].

Проте штучне збільшення швидкості мастила на вході в радіальний канал, за умови відсутності його протікання уздовж всієї довжини каналу (рис.2), призведе до значного зростання надлишкового тиску в обмотках трансформатора. Це може призвести до порушення нормальної циркуляції мастила в обмотці трансформатору, та може бути причиною виникнення аварійної ситуації.

4. Висновки

Отримані методом чисельного моделювання поля швидкостей течії мастила в каналах обмотки результати вказують на те, що навіть за умов наявності штучної швидкості на вході в радіальний канал не вдається організувати протікання мастила уздовж всієї довжини каналу. Тоді при природній циркуляції швидкість мастила в горизонтальних каналах є дуже незначною. Більша частина теплоти передається мастилу з бокових поверхонь котушок [4]. Крім того, забезпечення наявності штучної швидкості на вході в радіальний канал, є суто теоретичною і не може бути реалізована на практиці через те, що це внесе суттєві зміни в конструкцію трансформатора. Отже, досягти в реальних трансформаторних обмотках з шириною радіального каналу 1 мм швидкості руху мастила, що призведе до його наскрізної циркуляції, неможливо.

Список літератури: 1.Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов. Серия «Трансформаторы». Выпуск 36. Перевод с венгерского/ Л. Киш – М.: Энергия, 1980. - 208с.: ил. 2.Готтер, Г. Нагрев и охлаждение электрических машин/ Г. Готтер – М.: Энергоиздат, 1956. – 480с.: ил. 3.Протокол испытаний ОАХ 128 159.066. Исследование теплоотдачи обмоток с радиальной шириной 50 мм при естественном движении масла. Введен 23.11.76 / Ю.А. Михайловский, Л.В. Васильев, И.И. Щукина – Запорожье, ВИТ, 1976. - 68с.: черт. 4.Яковлева І.Г. Математичне моделювання теплообмінних процесів в обмотках трансформаторів з висотою горизонтального каналу менше 3 мм / І.Г. Яковлева, С.В. Ільїн // Математичне моделювання. Науковий журнал. Дніпродзержинськ. – 2010. - №1(22). – С.82-86.

Поступила в редакцію 05.06.2012

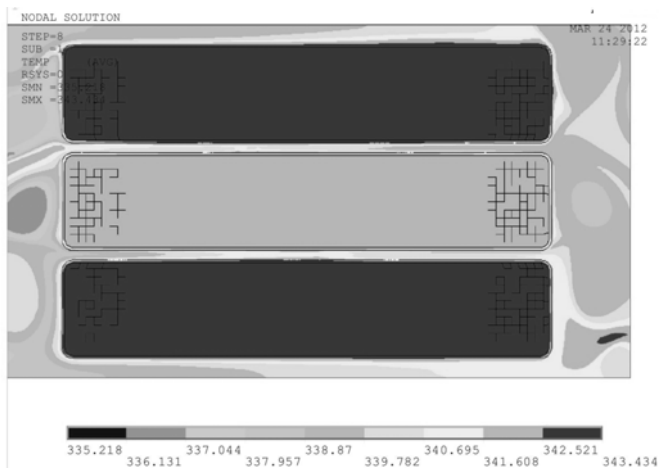


Рис. 3. Поле температури в обмотці трансформатора при заданій швидкості на вході в радіальний канал

Є.Є. ЧАЙКОВСЬКА, канд. техн. наук, с.н.с., доц., ОНПУ, Одеса

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ НА РІВНІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Представлені технології функціонування енергетичних систем на рівні прийняття рішень та оцінена їх ефективність.

Ключові слова: підтримка функціонування, технологія, прийняття рішень.

Представлены технологии функционирования энергетических систем на уровне принятия решений и оценена их эффективность.

Ключевые слова: поддержка функционирования, технология, принятия решений.

Presented Technology for Energy Systems at the decision and assessed their effectiveness.

Keywords: support operation, technology, decision-making.

1. Вступ

Відомі методи оптимізації енергетичних систем – економічний, ексергетичний, термoeкономіки дозволяють визначати оптимальні умови їх експлуатації без урахування зміни теплової акумулюючої ємності, що ускладнює узгодження виробництва та споживання енергії за рахунок використання додаткового обладнання [1, 2].

2. Постановка задачі

Реальні умови функціонування енергетичних систем потребують функціональної оцінки зміни теплової акумулюючої ємності, яка, відтворюючи виробництво та споживання енергії у співвідношенні, надає можливість прогнозувати зміну параметрів технологічного процесу, а не ліквідувати наслідки їх зміни.

3. Рішення задачі

Запропоновано підтримувати функціонування енергетичних систем на основі контролю працездатності й ідентифікації стану у складі експертних систем, архітектура яких базується на узгодженій взаємодії динамічної підсистеми – енергетичної системи як основи та блоків, що прогнозують складові технологічного процесу [3-5].

Математичне обґрунтування архітектури експертних систем:

$$ES = \left\{ \left[D(P(\tau) \langle x_0(\tau), x_1(\tau), x_2(\tau), f(\tau), K(\tau), y(\tau), d(\tau) \rangle, R(\tau), P(\tau)), \right. \right. \\ \left. \left. R(\tau), (P_i(\tau) \langle x_1(\tau), f_i(\tau), K_i(\tau), y_i(\tau) \rangle), \right] \right\}$$

де ES - експертна система; D - динамічна підсистема; P - властивості елементів експертної системи; τ - час, с; x - умови; f - параметри, що діагностуються; K - коефіцієнти математичного опису; y - вихідні параметри; d - динамічні параметри; R - відносини в ES . Індекси: i - число елементів

експертної системи; 0, 1, 2 - початковий режим, зовнішній, внутрішній характер впливів.

Так, на основі інтелектуальної системи підтримки функціонування системи теплопостачання з використанням сонячної енергії розроблено технологію акумулювання, що передбачає можливість визначити: межі зміни температури теплоносія, що гріє, для підтримки динамічної рівноваги процесу акумулювання шляхом включення чи відключення секцій теплообмінника, вбудованого в бак-акумулятор; граничну температуру теплоносія, що гріє, при якій можлива зміна виробників теплоти, а й при необхідності виконання додаткового підігріву місцевої води. Прийняття рішень на основі оцінки зміни теплової акумулюючої ємності з використанням вимірювань температури теплоносія, що гріє, яка змінюється за часом раніше, тобто до зміни температури води, що нагрівається, дозволяє використовувати до 85% акумульованої енергії. Більш того, не використання зміни витрати теплоносія, що гріє від геліоколектора для підтримки функціонування системи теплопостачання, знижує собівартість виробництва теплоти та термін окупності геліосистеми на 30-35% за рахунок відсутності додаткової площі дороговартих геліоколекторів. Очікуваний за рік економічний ефект при використанні бака-акумулятора ємністю 16000 кг із убудованим теплообмінником, площею $3,22\text{ м}^2$ для обслуговування як геліоколекторів площею 200 м^2 , так і при використанні традиційного джерела енергії і геліосистеми за літній сезон експлуатації складає 20% від загальної економії умовного палива. Економія газу на рік близько $28,6\text{ тис. м}^3$, що дає річне зниження викидів двоокису вуглецю $43,8\text{ т/рік}$. Енергозберігаюча технологія акумулювання має заохочувальне значення для традиційних виробників теплоти для використання геліосистем, завдяки яким вони мають можливість використовувати універсальний метод встановлення енергозберігаючих режимів функціонування системи теплопостачання [6].

Існують різноманітні технології виробництва біодизелю, що використовують як традиційні, так і інноваційні засоби щодо інтенсифікації тепломасообміну процесу етерифікації підігрітого масла у суміші з метанолом та каталізатором. Найважливішого значення при виробництві біогазу набуває виробляюча активність процесу зброджування сировини, що стає основоположною не тільки в плані підтримки функціонування біогазової установки, але і відображає її товарність. Але технології виробництва біопалива об'єднує найважливіша складова – значна тепла акумулююча ємність сировини, що при вимірах температури ускладнює підтримку функціонування біопаливних установок. Більш того, існуючі технології виробництва біопалива використовують зміну витрати теплоносіїв, що може порушити необхідний баланс складових процесу. Так, на основі прийняття рішень розроблені системи підтримки динамічної рівноваги процесу виробництва біопалива щодо зміни акумулюючої ємності сировини, зміни режимних умов функціонування щодо визначення порушення технологічного процесу, оцінки функціональної ефективності виробництва біопалива. Встановлення енергозберігаючих режимів функціонування, наприклад, біодизельної установки EXON-500, продуктивністю 12000 літрів біодизелю на добу дозволяє не тільки зменшити собівартість виробництва

біодизелю та термін окупності біодизельної установки, а й зекономити близько 20 т у. п. на рік, що при використанні природного газу складає близько 17000 м³ на рік, та дає в грошовому еквіваленті економію близько 43 тис. грн. [7].

Так, запропонована технологія теплонасосного енергопостачання на основі оцінки співвідношення виробництва та споживання енергії в інформаційному просторі: випарник - компресор та компресор - конденсатор, що дозволяє узгоджувати зміну витрати холодагента через випарник теплового насоса в залежності від температури низькопотенційного джерела енергії зі зміною витрати пари у конденсаторі теплового насоса при стиску пари у компресорі, рівень витрати якого визначено у випарнику.

З використанням запропонованої технології можливо, не використовуючи інерційні оцінки зміни параметрів теплоносіїв у випарнику та конденсаторі теплового насоса та не використовуючи додаткові теплові насоси, коректувати витрату холодагента у випарнику теплового насоса в залежності від температури низькопотенційного джерела енергії з ціллю його повного випаровування та забезпечення надійності компресора; узгоджувати рівень витрати холодагента у випарнику теплового насоса з рівнем потужності компресора щодо економного стиску пари; узгоджувати рівень подачі пари в конденсатор теплового насоса з рівнем подачі пари у випарник теплового насоса при використанні теплової ємності води в повній мірі [8]. У плані практичного використання запропонованої технології, розглянуто можливості ТОВ “Запलाзкий цукровий завод” щодо встановлення теплонасосного енергопостачання потужністю 15 кВт адміністративної будівлі за рахунок

використання технологічної води з температурою 45-50 °С у якості низькопотенційного джерела енергії. Визначено, що запропонована технологія теплонасосного енергопостачання дозволяє знизити собівартість виробництва теплоти до 50%, знизити термін окупності теплонасосної системи до 60% та здобути економію природного газу, що в грошовому еквіваленті складає близько 40 тис. грн. за рік.

В умовах енергозбереження на діючих ГАЕС виникає

необхідність підвищення ефективності систем гідроакумулювання та виробництва енергії щодо відношення енергії розряду до енергії заряду. З цією ціллю запропоновано підтримувати функціонування насосного та турбінного режимів ГАЕС на основі інформації, цінність якої полягає у відтворенні співвідношення між споживанням енергії та зарядом і виробництвом енергії та розрядом при використанні теплової ємності води, що акумулює в повній мірі та без вимірювання витрати води через водоводи. Розроблені як у фіксований

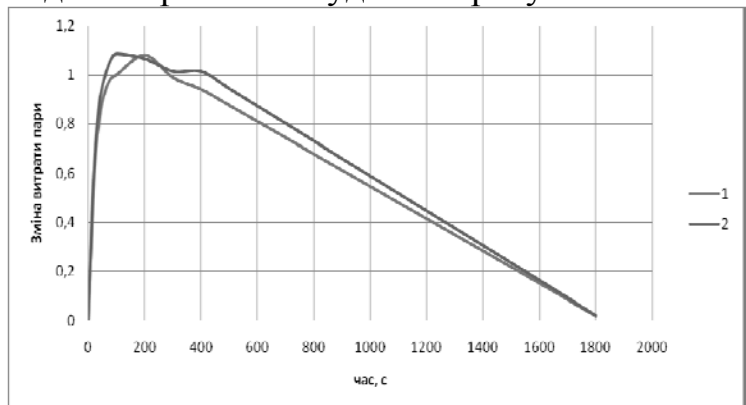


Рис.1. Технологія теплонасосного енергопостачання; 1,2 – діагностування зменшення, збільшення витрати пари хладагента через компресор теплового насоса, відповідно

інтервал часу, так і інтегровані за часом інтелектуальні системи підтримки процесів заряду, розряду та перевodu оборотної насос - турбіни в режим синхронного компенсатора на основі аналітичної оцінки зміни витрати води. Так, при використанні, наприклад, оборотної насос-турбіни типу РОНТ 115/851-В-630 встановлено, що зменшення витрат електроенергії при заряді на 30% за рахунок зменшення часу заряду, здобуття додаткового вироблення енергії при розряді на 5% за рахунок збільшення корисного об'єму водосховища дозволяють підвищити ефективність ГАЕС на 10-13% та здобути грошову економію приблизно 200 тис. грн. за 15 найбільш навантажених днів грудня [9].

Функціональне діагностування зміни ємності електроаккумулятора в режимах заряду-розряду при використанні вітроенергетичної установки (ВЕУ) ускладнено не постійністю вітрового потоку та зміною споживання електроенергії. Існуючі системи підтримки функціонування ВЕУ використовують не завжди достовірну оцінку зміни напруги заряду та розряду, наприклад, свинцево-кислотного електроаккумулятора, що відбувається пізніше за часом ніж зміна температури електроліту, її щільності у порах пластин та над пластинами. У зв'язку із значною тепловою ємністю електроліту обчислення зміни його параметрів не завжди здатні визначити гранично припустиму працездатність електроаккумулятора щодо як можливого його перезаряду, так і недопустимого розряду, бо не оцінюють зміну теплової акумулюючої ємності електроаккумулятора [3-5].

Запропоновано експертну систему, архітектура якої заснована на узгодженій взаємодії динамічної підсистеми – електроаккумулятора як основи та блоків заряду-розряду, зміни ємності та оцінки функціональної ефективності системи електроакмулювання з використанням інформації як міри відтворення співвідношення між виробництвом та споживанням енергії в єдиному інформаційному просторі [3-5].

Основою для здобуття діагностичної інформації як еталонної, так і функціональної є передатна функція за каналом «температура електроліту – витрата електроліту», здобута в результаті рішення системи нелінійних диференціальних рівнянь [3-5].

$$W_{t-G1} = \frac{K_B \varepsilon (1 - L_3^*)}{L_B \beta \gamma} (1 - e^{-\gamma_1 \xi}),$$

$$\text{де } K_B = \frac{m(\theta_0 - t_0)}{G_0}; \quad \varepsilon = \frac{\alpha_{30} h_{30}}{\alpha_{B0} h_{B0}}; \quad L_3^* = \frac{1}{L_3 + 1}; \quad L_3 = \frac{G_3 C_3}{\alpha_{30} h_{30}}; \quad L_B = \frac{G_B C_B}{\alpha_{B0} h_{B0}};$$

$$\beta = T_M S + \varepsilon^* + 1; \quad T_M = \frac{g_M C_M}{\alpha_{B0} h_{B0}}; \quad \varepsilon^* = \varepsilon(1 - L_3^*); \quad \gamma = \frac{(T_B S + 1)\beta - 1}{L_B \beta}; \quad T_B = \frac{g_B C_B}{\alpha_{B0} h_{B0}}; \quad L_B = \frac{G_B C_B}{\alpha_{B0} h_{B0}};$$

$$\gamma_1 = \frac{(T_B S + 1)\beta - 1}{\beta}; \quad \xi = \frac{z}{L_B},$$

де t , θ - температура електроліту, пластини, К, відповідно; G – витрата речовини, кг/с; C – питома теплоємність, кДж/(кг·К); α – коефіцієнт тепловіддачі, кВт/(м²·К); h – питома поверхня, м²/м; g – питома маса речовини, кг/м; z – координата довжини пластини, м; T_B , T_M – постійні часу, що характеризують теплову акумулюючу здатність робочого тіла, метала, с; m – показник залежності коефіцієнта тепловіддачі від витрати; S – параметр перетворення Лапласа.

Індекси: в – внутрішній потік, м – металева стінка, з – зовнішній потік; 0, 1- початкові умови, вхід в електроаккумулятор, відповідно.

Так, на основі метода графа причинно-наслідкових зв'язків [3-5] розроблена логічна модель контролю працездатності електроаккумулятора на рівні прийняття рішень. Ситуація зміни температури електроліту у режимі заряду-розряду щодо зміни ємності електроаккумулятора розпізнається таким чином:

$$ES = (((D(P(\tau))(CT_1(\tau), (x_0(\tau), x_1(\tau)(G_{зар.}(\tau)(0), G_{роз.}(\tau)(0), t_e(\tau)(-)(+))))), Z_{c1}(\tau), (CT_2(\tau)(f(\tau)(\theta(\tau)(-)(+)(t_e(\tau)(-)(+))))), Z_{c2}(\tau), (CT_3(\tau)(K(\tau)(K_b(\tau)(+)(-))))), Z_{c3}(\tau), (CT_4(\tau)(y(\tau)(U(\tau)(0)(0))))), Z_{c4}(\tau), (CT_5(\tau)(d(\tau)(\Delta t(\tau) / \Delta t_{вст.розр.}(\tau)(-)(+))))), Z_{c5}(\tau), (CT_c(\tau)(\Delta t(\tau) / \Delta t_{вст.розр.зар.}(\tau) > \Delta t_{розр.}(\tau) / \Delta t_{вст.розр.зар.}(\tau))), \quad (1)$$

$$(CT_c(\tau)(-\Delta t(\tau) / -\Delta t_{вст.розр.розр.}(\tau) < -\Delta t_{розр.}(\tau) / \Delta t_{вст.розр.розр.}(\tau))), \quad (2)$$

де ES - експертна система; D - динамічна підсистема; P - властивості елементів експертної системи; Z - логічні відносини; CT - контроль події; U – напруга, v ; x - впливи; f - параметри, що діагностуються; K - коефіцієнти математичного опису; y - вихідні параметри; d - динамічні параметри; t – час, с. Індекси: 0, 1, 2 - початковий стан, зовнішній, внутрішній характер впливів; 3- коефіцієнти рівнянь динаміки; 4- суттєві параметри, що діагностуються; 5- динамічні параметри; c - контроль працездатності; вст. розр. – максимальне розрахункове значення зміни параметра; e – електроліт; розр.- розрахункове значення зміни параметра; зар., розр. - заряд, розряд, відповідно.

Так, наприклад, на основі узгодженої взаємодії динамічної підсистеми та блоку зміни ємності електроаккумулятора у складі експертної системи з використанням підсумкової інформації (1, 2) при безперервному вимірюванні температури електроліту у фіксований інтервал часу можливо приймати рішення на збільшення чи зменшення ємності електроаккумулятора, відповідно, до зміни його напруги (рис.2). Згідно метода графа причинно-наслідкових зв'язків [3-5] відбувається також ідентифікація нового стану функціонування системи електроакмулювання (рис.2).

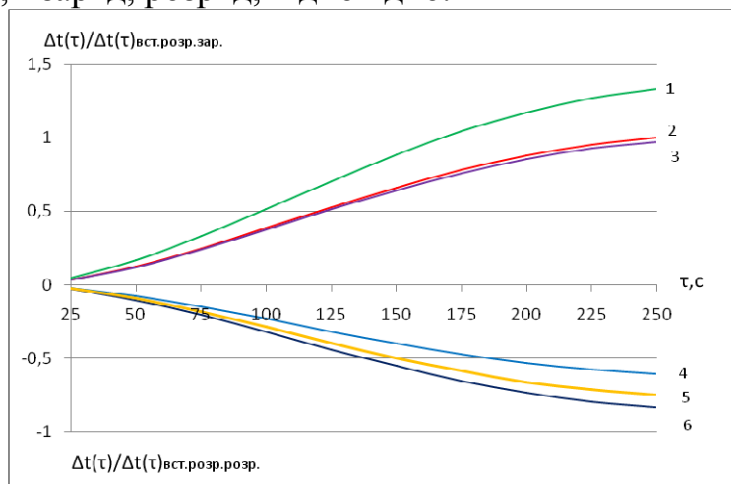


Рис. 2. Експертна система контролю працездатності електроаккумулятора: 1, 6 – функціональне діагностування збільшення, зменшення ємності; 2, 5 -гранично припустима працездатність при заряді та розряді, відповідно; 3, 4 - прийняття рішень та ідентифікація нових умов функціонування щодо додаткового заряду чи розряду, відповідно

З використанням запропонованої експертної системи контролю працездатності електроакумулятора можливо своєчасно приймати рішення щодо зміни ємності електроакумулятора на основі контролю співвідношення виробництва та споживання енергії в умовах непостійності вітрового потоку. Такий підхід дозволяє не тільки підтримувати процес електроакумуляції, не допускаючи перезаряду та не допустимого розряду електроакумулятора, а й, встановлюючи зв'язок з теплоакумуляуванням, виконувати перерозподіл енергії щодо збільшення терміну використання вітроенергетичної установки. Так, дійсно, в умовах непостійності вітрового потоку існуючі принципові схеми вітродизельних енергетичних установок, наприклад, встановлюють режими функціонування без урахування можливостей теплоелектроакумулятора в перерозподілі акумуляованої енергії. Запропонована технологія підтримки заряду на основі розробленої інтегрованої системи зміни температури води в акумуляторі з використанням прийняття рішень на зміну витрати води, що нагрівається. Зміна рівня акумуляції під час заряду теплоелектроакумулятора дозволяє за рахунок зменшення часу заряду додатково акумуляувати якісну енергію в електроакумуляторі і здобувати економію дизельного палива для вітродизельної установки потужністю 10 кВт, наприклад, що в грошовому еквіваленті складає приблизно 60 тис. грн. за рік [10].

4. Висновки

Представлені технології підтримки функціонування енергетичних систем на рівні прийняття рішень мають енергозберігаючу цінність, бо базуються на інтелектуальному управлінні тепломасообмінними процесами.

Список літератури: 1. *Мацевитый Ю.М.* Термoeкономический анализ теплонасосной системы теплоснабжения / *Ю.М. Мацевитый, Н.Б. Чиркин, М.А. Кузнецов* // Проблемы машиностроения.- 2010.- №1, т.13.- С.42-51. 2. *Редько А.А.* Исследование термодинамических режимов геотермальных теплонасосных установок / *А.А. Редько, Д.Х. Харлампиди* // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури.- 2009.-№2(76) .- С.86— 98. 3. *Чайковська Є.Є.* Інтелектуальне управління функціонуванням енергетичних систем на основі контролю їх працездатності / *Є.Є.Чайковська*// Восточно - Европейский журнал передовых технологий.- 2006.- №3/2(21).- С.48-52. 4.*Чайковская Е.Е.* Управление согласованием производства и потребления теплоты на уровне принятия решений / *Е.Е. Чайковская* //Восточно-Европейский журнал передовых технологий.-2007.- № 2/3(26) .- С.16-20. 5. *Чайковская Е.Е.* Поддержание функционирования энергетических систем на основе интеллектуального управления тепломассообменными процессами // ММФ-2008: VI Минский международный форум по тепло- и массообмену: Тез. докл. и сообщ. / Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси. 19-23 мая 2008 г. Минск, 2008. Т.2.С.304-306. 6. *Чайковська Є.Є.* Техніко-економічна оцінка енергозберігаючої технології комбінованого теплопостачання / *Н.Ф. Іщук* // Восточно-Европейский журнал передовых технологий.- 2011.- №4/8(52).- С.45-47. 7. *Чайковська Є.Є.* Підтримка функціонування біопаливних установок/ *К.О. Кустов* // Восточно-Европейский журнал передовых технологий.- 2012.- №2/10(56).- С.41-44. 8. *Чайковська Є.Є.* Інтелектуальна система управління теплонасосним енергопостачанням / *В.В. Стефанюк* // Вісник Вінницького політехнічного інституту.- 2011.- №5.- С. 76-83. 9. *Чайковська Є.Є.* Підтримка гідроакумуляції та виробництва енергії на рівні прийняття рішень / *Є.Є. Чайковська* // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. -2010.- №2/7(44).- С.15-21. 10. *Чайковська Є.Є., Сивоглаз Г.В.* Підтримка функціонування вітродизельної енергетичної установки // VI Международная научно-практическая конференция “Aktualni vymozenosti Vedy -2010”: Материалы докл. / Прага. 27 июня -5 июля 2010. С.39-43.

Поступила в редколлегию 11.06.2012

О.В. ПОТЕТЕНКО, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ», Харьков,
О.М. ГРИШИН, ст. преп., НТУ «ХПИ», Харьков,
Л.Р. РАДЧЕНКО, н.с., НТУ «ХПИ», Харьков,
Л.К. ЯКОВЛЕВА, ст. преп., НТУ «ХПИ», Харьков,
Е.С. КРУПА, м.н.с., НТУ «ХПИ», Харьков,
О.С. ВАХРУШЕВА, м.н.с., НТУ «ХПИ», Харьков,
А.А. ГУЛАХМАДОВ, асп., НТУ «ХПИ», Харьков

РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС РАДИАЛЬНО-ДИАГОНАЛЬНОЙ ГИДРОТУРБИНЫ (РОД). МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ПРОГНОЗНОЙ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Розглянутий робочий процес радіально-діагональної гідротурбіни і пропонується метод побудови прогнозової характеристики. Проведено порівняння пропонованої гідротурбіни РОД400 з гідротурбіною РО400

Ключові слова: радіально-діагональна турбіна, проточна частина, робоче колесо, енергетичні характеристики, прогнозна універсальна характеристика

Рассмотрен рабочий процесс радиально-диагональной гидротурбины и предлагается метод построения прогнозной характеристики. Проведено сравнение предлагаемой гидротурбины РОД400 с гидротурбиной РО400

Ключевые слова: радиально-диагональная турбина, проточная часть, рабочее колесо, энергетические характеристики, прогнозная универсальная характеристика

The working process of radial-diagonal hydro-turbine is considered and the method of construction of prognosis description is offered. Comparing of the offered hydro-turbine of ROD400 is conducted to the hydro-turbine of RO400

Keywords: radial-diagonal turbine, running part, driving wheel, power descriptions, prognosis universal description

Дальнейший технический прогресс связан с повышением на душу населения потребления энергоресурсов. Энергетические ресурсы Земли по данным на 1993 год составляют:

Уголь, нефть, газ 11×10^{12} т.у.т.	Ветровая энергия 2×10^{12} т.у.т.
Уран 8×10^{12} т.у.т.	Гидроэнергия 7×10^{12} т.у.т.
Солнечная энергия 900×10^{12} т.у.т.	Геотермальная энергия 1770×10^{12} т.у.т.

Мировое энергопотребление 0.01×10^{12} т.у.т.

Ряд возобновляемых энергоресурсов с большими задержками используется для производства энергии вследствие сравнительно низких по плотности энергетических потоков:

Волновая энергия < 100 квт/м ²	Энергия приливов $0,002$ квт/м ²
Ветровая < 3 квт/м ²	Биомасса $< 0,0002$ квт/м ²
Солнечная $< 0,1$ квт/м ²	Геотермальная $< 0,00006$ квт/м ²

Для сравнения:

сжигание угля на крупных электростанциях 500 квт/м²

ядерная энергетика 600 кВт/м²

В заключение следует отметить, что многие специалисты в области энергетики склоняются к тому, что дальнейшее развитие выработки электроэнергии будет связано с атомной энергетикой и с увеличением потребления органического топлива.

Как известно, крупные энергоблоки потребляющие органическое или ядерное топливо и оборудованные мощными паровыми турбинами не могут эксплуатироваться в режиме снятия пиковых нагрузок суточного регулирования. Во многих развитых странах расширяется строительство гидроэлектростанций (ГЭС) и гидроаккумулирующих станций (ГАЭС) призванных к эксплуатации на пиковых нагрузках суточного регулирования.

Как видно из вышеприведенных цифр мировые запасы гидроэнергии далеко не исчерпаны. Что касается Украины, то, по мнению специалистов, гидроэнергетические ресурсы здесь используются менее чем на 10%.

В плане строительства новых ГЭС и ГАЭС возникает задача повышения энергокавитационных показателей гидроагрегатов работающих на пиковых нагрузках и в первую очередь это связано с расширением по расходам (мощностям) и напорам зоны надежной и высокоэффективной эксплуатации гидротурбин.

В этом направлении рассматривается рабочий процесс нового типа радиально-диагональных гидротурбин (рис. 1).

Рабочий процесс радиально-диагональной гидротурбины основан на комбинаторной

трехэлементной зависимости согласующей открытие направляющего аппарата расположенного перед рабочим колесом РОД гидротурбины с разворотом лопаток промежуточного направляющего аппарата и углом разворота лопастей диагонального колеса, направленной на минимизацию потерь напора при различных режимах эксплуатации РОД гидротурбин. В соответствии с комбинаторной зависимостью общий напор РОД гидротурбины $H^{(РОД)}$ срабатывается на радиально-осевой лопастной ступени $H^{(РО)}$ и на диагональной лопастной ступени $H^{(Д)}$ при условии $H^{(РОД)} = H^{(РО)} + H^{(Д)}$, обеспечивая при этом, путем изменения соотношений срабатываемых напоров на каждой ступени (комбинаторная зависимость), минимум потерь суммарно срабатываемого напора $H^{(РОД)}$.

Гидравлические потери на первой (радиально-осевой) ступени состоят из потерь в спиральной камере $h_{сп} = \zeta_{сп} H^{(РО)}$, потерь в каналах колонн статора $h_{к.ст} = \zeta_{к.ст} H^{(РО)}$, потерь в межлопаточных каналах направляющего аппарата

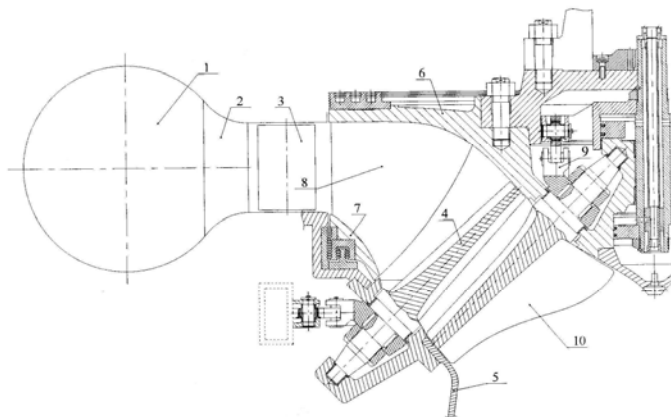


Рис. 1. Высоконапорная радиально-диагональная гидротурбина

$h_{н.а.} = \zeta_{н.а.} H^{(PO)}$ и потерь в межлопастных каналах рабочего колеса $h_{рк} = \zeta_{рк} H^{(PO)}$, где ζ - коэффициент потерь.

Все коэффициенты потерь первой ступени относятся к напору срабатываемому на первой (РО) ступени, т.к. подводящие органы обеспечивают расход и момент количества движения потока перед РО лопастной системой соответствующей оптимальной работе и соответственно сработки с минимальными потерями напора $H^{(PO)}$ в соответствии с уравнением Эйлера $\frac{\eta_{\Gamma}^{(PO)} g H^{(PO)}}{\omega} = (rV_u)_1^{(PO)} - (rV_u)_2^{(PO)}$.

Суммарные гидравлические потери напора на первой (РО) ступени соответственно равны:

$$\begin{aligned} h^{(PO)} &= h_{сп}^{(PO)} + h_{к.ст.}^{(PO)} + h_{н.а.}^{(PO)} + h_{рк}^{(PO)} = (\zeta_{сп}^{(PO)} + \zeta_{к.ст.}^{(PO)} + \zeta_{н.а.}^{(PO)} + \zeta_{рк}^{(PO)}) H^{(PO)} = \\ &= \zeta^{(PO)} H^{(PO)} = (1 - \eta_{\Gamma}^{(PO)}) H^{(PO)} \end{aligned} \quad (1)$$

где $\eta_{\Gamma}^{(PO)}$ - гидравлический КПД первой ступени РОД турбины.

Гидравлические потери напора на второй ступени (диагональной лопастной системы) состоят из потерь в межлопаточных каналах промежуточного направляющего аппарата, расположенного перед диагональной (Д) лопастной системой $h_{н.а.}^{(Д)} = \zeta_{н.а.}^{(Д)} H^{(Д)}$, потерь в межлопастных каналах второй (Д) лопастной ступени $h_{рк}^{(Д)} = \zeta_{рк}^{(Д)} H^{(Д)}$ и потерь в отсасывающей трубе $h_{отс.тр}^{(Д)} = \zeta_{отс.тр}^{(Д)} H^{(Д)}$.

Все коэффициенты потерь второй ступени соотносятся к напору срабатываемому второй (Д) ступенью, т.к. промежуточный направляющий аппарат, лопастная система и отсасывающая труба функционируют на условиях сработки напора $H^{(Д)}$, расхода $Q^{(Д)} = Q^{(PO)} = Q^{(РОД)}$ и изменения момента количества движения на второй (диагональной) лопастной системе в соответствии с уравнением Эйлера для этой системы:

$$\frac{\eta_{\Gamma}^{(Д)} g H^{(Д)}}{\omega} = (rV_u)_1^{(Д)} - (rV_u)_2^{(Д)}.$$

Суммарные гидравлические потери напора на второй (Д) ступени соответственно равны:

$$\begin{aligned} h^{(Д)} &= h_{н.а.}^{(Д)} + h_{рк}^{(Д)} + h_{отс.тр}^{(Д)} = (\zeta_{н.а.}^{(Д)} + \zeta_{рк}^{(Д)} + \zeta_{отс.тр}^{(Д)}) H^{(Д)} = \\ &= \zeta^{(Д)} H^{(Д)} = (1 - \eta_{\Gamma}^{(Д)}) H^{(Д)} \end{aligned} \quad (2)$$

где $\eta_{\Gamma}^{(Д)}$ - гидравлический КПД второй ступени РОД турбины.

Подводя итоги вышеизложенному можно сделать следующие выводы:

1) расход через РОД турбину одинаков для первой и второй лопастных систем $Q^{(РОД)} = Q^{(Д)} = Q^{(PO)}$;

2) частота вращения ротора РОД турбины: $\omega^{(РОД)} = \omega^{(PO)} = \omega^{(Д)}$;

3) срабатываемый напор $H^{(РОД)}$ на радиально-диагональной гидротурбине распределяется в соответствии с комбинаторной зависимостью следующим образом: $H^{(РОД)} = H^{(PO)} + H^{(Д)}$;

4) гидравлические потери напора в радиально-диагональной турбине состоят из суммы потерь напора на первой и второй лопастной системах:

$$h^{(РОД)} = h^{(РО)} + h^{(Д)} = \zeta^{(РО)} H^{(РО)} + \zeta^{(Д)} H^{(Д)} = (1 - \eta_{\Gamma}^{(РО)}) H^{(РО)} + (1 - \eta_{\Gamma}^{(Д)}) H^{(Д)} \quad (3)$$

5) коэффициент потерь в радиально-диагональной гидротурбине определяется как:

$$\begin{aligned} \zeta^{(РОД)} &= \frac{h^{(РОД)}}{H^{(РОД)}} = \frac{1}{H^{(РОД)}} (\zeta^{(РО)} H^{(РО)} + \zeta^{(Д)} H^{(Д)}) = \\ &= \zeta^{(РО)} \frac{H^{(РО)}}{H^{(РОД)}} + \zeta^{(Д)} \frac{H^{(Д)}}{H^{(РОД)}} = (1 - \eta_{\Gamma}^{(РО)}) \frac{H^{(РО)}}{H^{(РОД)}} + (1 - \eta_{\Gamma}^{(Д)}) \frac{H^{(Д)}}{H^{(РОД)}} \end{aligned} \quad (4)$$

6) гидравлический коэффициент полезного действия радиально-диагональной гидротурбины (РОД) соответственно будет равен:

$$\eta_{\Gamma}^{(РОД)} = (1 - \zeta^{(РОД)}) = \frac{1}{H^{(РОД)}} (\eta_{\Gamma}^{(РО)} H^{(РО)} + \eta_{\Gamma}^{(Д)} H^{(Д)}) \quad (5)$$

Рассмотрим рабочий процесс радиально-диагональной гидротурбины с диаметром $D_1^{(РОД)} = 1\text{ м}$ при напоре срабатываемом на турбине $H^{(РОД)} = 1\text{ м}$.

Тогда расход через эту турбину будет равен $Q^{(РОД)} = Q_1^{(РОД)}$ (где $Q_1' = \frac{Q}{D_1^2 \sqrt{H}}$).

Обороты вращения ротора: $n^{(РОД)} = n_1'^{(РОД)}$ (где $n_1' = \frac{n D_1}{\sqrt{H}}$).

Напомним также, что $Q^{(РОД)} = Q^{(Д)} = Q^{(РО)}$, $n^{(РОД)} = n^{(РО)} = n^{(Д)}$.

Предположим, в качестве примера, что наша РОД модельная гидротурбина (с $D_1^{(РОД)} = 1\text{ м}$ и $H^{(РОД)} = 1\text{ м}$) предназначена для установки на напор 400 м (РОД-400) с распределением сработки напора на первой ступени 310 м (прототип РО-310) и на второй ступени 90 м (прототип Д-90). На эти параметры прототипами могут служить гидротурбины РО-310/1107-В-38,8 №3439 ХТЗ с $n_{\text{опт}}' = 63\text{ об/мин}$, $Q_{\text{опт}}' = 400\text{ л/сек}$ и $\eta_{\Gamma, \text{опт}} = 92,8\%$ (рис. 2) и ПЛД-90/2556-В-45-46 №2581 ЛМЗ или ПЛД-90/2556а-В-45-46 №2561 ЛМЗ, имеющие $n_{\text{опт}}' = 86\text{ об/мин}$, $Q_{\text{опт}}' = 850\text{ л/сек}$ и $\eta_{\Gamma, \text{опт}} = 92,1\%$ (рис. 3).

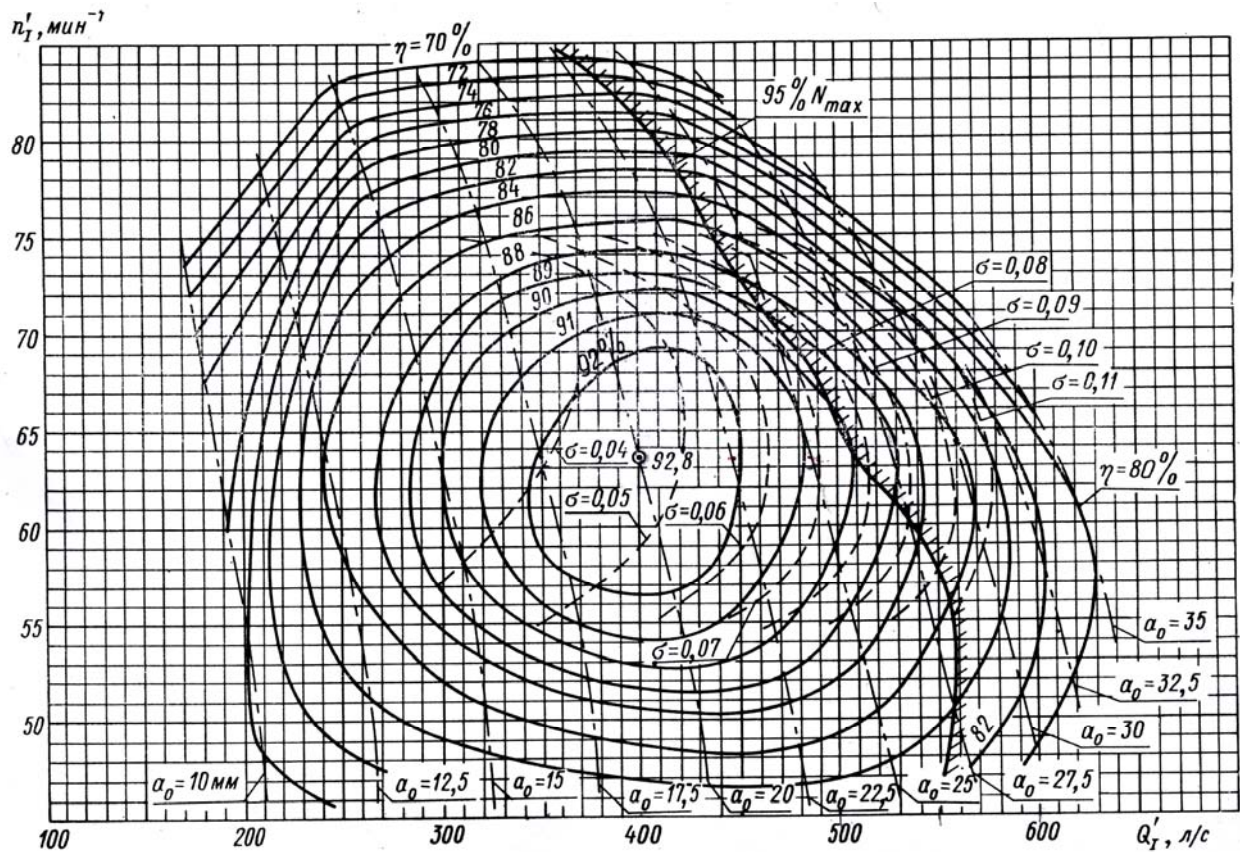


Рис. 2. Универсальная характеристика РО-310/1107-В-38,8 №3439

Модельная радиально-диагональная гидротурбина работающая при напоре $H^{(POD)} = 1\text{ м}$ с диаметром рабочего колеса $D_1^{(POD)} = 1\text{ м}$ на основе вышеприведенных прототипов будет иметь следующее распределение срабатываемых напоров на первой (РО) и второй (Д) лопастных системах:

$$H^{(PO)} = 1\text{ м} \cdot \frac{310}{400} = 0,775\text{ м}; \quad H^{(D)} = 1\text{ м} \cdot \frac{90}{400} = 0,225\text{ м} \text{ на оптимальном режиме}$$

эксплуатации РОД гидротурбины.

Для конкретного рассматриваемого варианта $(n'_{1onm})^{(PO)} = 63\text{ об/мин}$ и $(Q'_{1onm})^{(PO)} = 400\text{ л/сек}$ не трудно определить реальные величины оборотов и расхода из учета, что $n'_1 = \frac{nD_1}{\sqrt{H}}$ и $Q'_1 = \frac{Q}{D_1^2 \sqrt{H}}$, т.е. $n = \frac{n'_1 \sqrt{H}}{D_1}$; $Q = Q'_1 D_1^2 \sqrt{H}$.

Таким образом, $Q_{opt}^{(PO)} = (Q'_{1opt})^{(PO-310)} \cdot D_1^{(PO)} \sqrt{H}$, где $D_1^{(PO)} = 1\text{ м}$, $H^{(PO)} = 0,775\text{ м}$, т.е. $Q_{opt}^{(PO)} = 400 \cdot \sqrt{0,775} = 352,1\text{ л/сек}$.

Аналогично приведенному выше: $n_{opt}^{(PO)} = 63 \cdot \sqrt{0,775} = 55,4\text{ об/мин}$.

Известно, что расход через модельную гидротурбину РОД-400 при диаметре рабочего колеса $D_1 = 1$ м и срабатываемом напоре $H = 1$ м равны приведенным величинам для РОД гидротурбины и также равны расходу и оборотам радиально-осевой

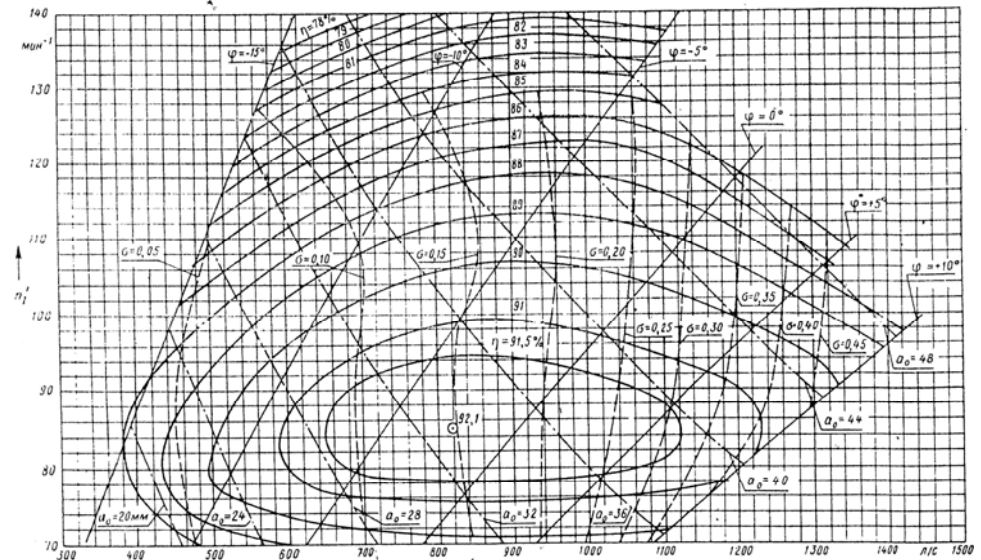


Рис. 3. Универсальная характеристика ПЛД-90/2556а-В-45-46 №2561

первой лопастной системы, т.е.:

$$Q_{\text{опт}}^{(\text{РО})} = Q_{\text{опт}}^{(\text{РОД})} = (Q'_{\text{опт}})^{(\text{РОД})}; n_{\text{опт}}^{(\text{РО})} = n_{\text{опт}}^{(\text{РОД})} = (n'_{\text{опт}})^{(\text{РОД})}.$$

Цифровые величины $Q_{\text{опт}}^{(\text{РОД})} = (Q'_{\text{опт}})^{(\text{РОД})}$ и $n_{\text{опт}}^{(\text{РОД})} = (n'_{\text{опт}})^{(\text{РОД})}$ являются предварительными и подлежат небольшой корректировке в процессе определения диаметра рабочего колеса диагонально лопастной системы из условий совмещения оптимумов $n'_{\text{опт}}$ и $Q'_{\text{опт}}$ лопастных систем первой и второй ступени (РО и Д систем).

Из условия совмещения оптимумов универсальных характеристик (минимумов гидравлических потерь) по расходам РО-310 и ПЛД-90, принимая в расчет, что $Q_{\text{опт}}^{(\text{РОД})} = Q_{\text{опт}}^{(\text{РО})} = Q_{\text{опт}}^{(\text{Д})} = Q_{\text{опт}}$ и $(Q'_{\text{опт}})^{(\text{Д})} = \frac{Q_{\text{опт}}}{(D_1^{(\text{Д})})^2 \sqrt{H^{(\text{Д})}}}$ при $D_1^{(\text{Д})}$

подлежащем определению и $H^{(\text{Д})} = 0,225$ м получим расчетное выражение:

$$D_1^{(\text{Д})} = \sqrt{\frac{Q_{\text{опт}}}{(Q'_{\text{опт}})^{(\text{Д})} \sqrt{H^{(\text{Д})}}}} \quad (6)$$

Из условия совмещения оптимумов универсальных характеристик по оборотам РО-310 и ПЛД-90, принимая в расчет, что

$$(n'_{\text{опт}})^{(\text{РОД})} = n_{\text{опт}}^{(\text{РОД})} = n_{\text{опт}}^{(\text{РО})} = n_{\text{опт}}^{(\text{Д})} = n_{\text{опт}} \quad \text{и} \quad (n'_{\text{опт}})^{(\text{Д})} = \frac{n_{\text{опт}} D_1^{(\text{Д})}}{\sqrt{H^{(\text{Д})}}} \quad \text{при} \quad D_1^{(\text{Д})}$$

подлежащем определению и $H^{(\text{Д})} = 0,225$ м, получим следующее расчетное выражение:

$$D_1^{(\text{Д})} = \frac{(n'_{\text{опт}})^{(\text{Д})} \sqrt{H^{(\text{Д})}}}{n_{\text{опт}}} \quad (7)$$

Как показывают расчеты диаметры рабочего колеса диагональной лопастной системы полученные по формулам (6) и (7) отличаются менее, чем на 5%.

Взяв их полусумму и округлив $D_1^{(Д)}$ получим окончательную величину $D_1^{(Д)}$ позволяющую обоснованно прочертить контур проточной части радиально-диагональной гидротурбины, после чего окончательно уточняется расположение оптимума универсальной характеристики радиально-диагональной гидротурбины, т.е. определяются величины $(Q'_1)_{\text{опт}}^{(РОД)} = Q_{\text{опт}}^{(РОД)}$, $(n'_1)_{\text{опт}}^{(РОД)} = n_{\text{опт}}^{(РОД)}$ и $\eta_{г. \text{опт}}^{(РОД)}$.

Перейдем теперь к вопросу методики построения прогнозной универсальной характеристики радиально-диагональной гидротурбины.

Таблица 1- К построению прогнозной универсальной характеристики

$H^{(РОД)} = 1 \text{ м}$		Значения $(Q'_1)^{(РОД)} = Q = Q^{(Д)} = Q^{(РО)}$											
$D_1^{(РОД)} = 1 \text{ м}$		0,175	0,2	0,225	0,25	0,275	0,3	0,325	0,35	0,375	0,4	0,425	0,45
$(n'_1)^{(РОД)} = n = n^{(РО)} = n^{(Д)}$	65												
	62,5												
	60												
	57,5												
	55												
	52,5												
	50												
	47,5												

Расчеты для построения прогнозной универсальной характеристики РОД-400 проводим в табличной форме (табл. 1) применительно к модельной

гидротурбине РОД-400 с диаметром рабочего колеса $D_1 = 1 \text{ м}$ при напоре

$H=1 \text{ м}$, ориентируясь на вышеотмеченные прототипы гидротурбин РО-310 и ПЛД-90, при этом используется метод последовательных приближений при нахождении минимума гидравлических потерь энергии (минимума $\zeta^{(РОД)}$ - формула (4)) или максимума гидравлического КПД (максимума $\eta_{г.}^{(РОД)}$ - формула (5)).

В качестве примера возьмем ячейку с $(Q'_1)^{(РОД)} = 0,35 \text{ м}^3/\text{сек}$ и

$(n'_1)^{(РОД)} = 52,5 \text{ об/мин}$ (табл. 2).

Принимая во внимание, что один и тот же расход и обороты имеют лопастные системы первой (РО) и второй (Д) ступени, взяв в качестве распределения сработки напоров нулевого приближения

$$H_{(0)}^{(РО)} = H^{(РОД)} \frac{310}{400} = 1 \text{ м} \cdot \frac{310}{400};$$

$$H_{(0)}^{(Д)} = H^{(РОД)} \frac{90}{400} = 1 \text{ м} \cdot \frac{90}{400}$$

определяем при известном значении $D_1^{(PO)} = 1\text{ м}$ и $D_1^{(Д)}$ - ранее определенном величины (Q_1') и (n_1') для радиально-осевой и диагональной лопастных систем.

По универсальным характеристикам прототипов (РО-310 и ПЛД-90) определяем $\eta_{\Gamma}^{(PO)}$ и $\eta_{\Gamma}^{(Д)}$. Вычисляем по формуле (5) при $H^{(РОД)} = 1\text{ м}$ гидравлический КПД нулевого приближения радиально-диагональной гидротурбины.

Изменяя соотношения между $H^{(PO)}$ и $H^{(Д)}$, при условии $H^{(PO)} + H^{(Д)} = 1\text{ м}$, повторяем расчеты пока не получим такое соотношение между срабатываемыми напорами, которое обеспечивает максимальный гидравлический КПД радиально-диагональной гидротурбины. Это является обязательным условием комбинаторной зависимости.

Оптимальное соотношение между $H^{(PO)}$ и $H^{(Д)}$ для каждой точки универсальной характеристики радиально-диагональной гидротурбины позволит определить значения η_{Γ} ; a_0 (открытие направляющего аппарата, расположенного перед радиальной лопастной системой), σ (определяемое диагональной лопастной системой), φ (угол разворота лопастей диагональной лопастной системы).

Таблица 2 - Ячейка с $(Q_1')^{(РОД)} = 0,35\text{ м}^3/\text{сек}$ и $(n_1')^{(РОД)} = 52,5\text{ об/мин}$

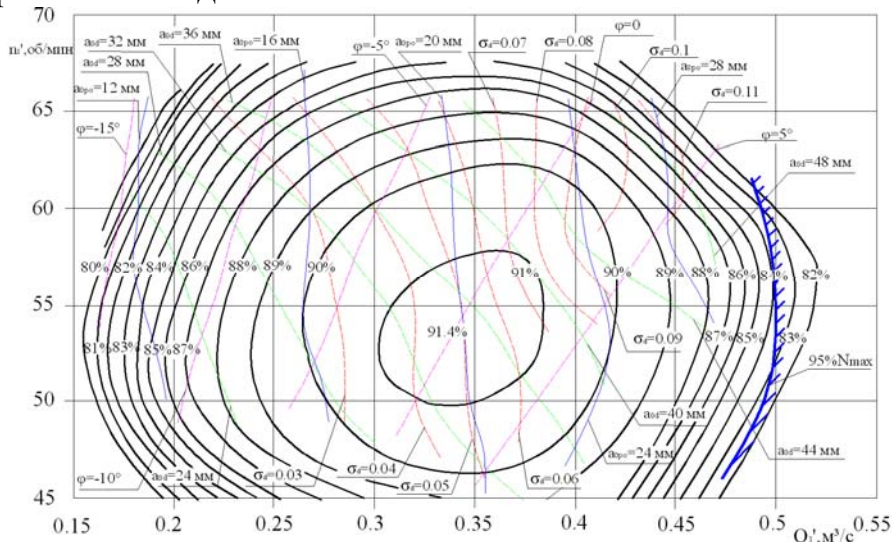
$H^{(РОД)} = 1\text{ м}$	$(n_1')^{(PO)} =$
$(n_1')^{(РОД)} = 52,5\text{ об/мин}$	$(n_1')^{(Д)} =$
$(Q_1')^{(РОД)} = 0,35\text{ м}^3/\text{сек}$	$\eta_{\Gamma}^{(РОД)} =$
$H^{(PO)} =$	$a_0 =$
$H^{(Д)} =$	$\sigma =$
	$\varphi =$
$(Q_1')^{(PO)} =$	
$(Q_1')^{(Д)} =$	

Оптимальные соотношения между $H^{(PO)}$ и $H^{(Д)}$, используя уравнения Эйлера для первой и второй лопастной системы, позволят установить расчетные углы разворота лопаток промежуточного направляющего аппарата.

В заключении следует отметить, что при определении гидравлического КПД радиально-диагональной гидротурбины по результатам модельных лабораторных испытаний он по всей вероятности будет несколько большим как в оптимуме, так и на режимах отличных от оптимального вследствие следующих обстоятельств. При рассмотрении прототипа РО-310 величина η_{Γ} определялась с учетом потерь в отсасывающей трубе, но для первой ступени РОД турбины они будут равны нулю.

При рассмотрении прототипа ПЛ-90 величина η_r определялась с учетом потерь в спиральной камере и в каналах статора, которые равны также нулю для второй ступени РОД турбины. К тому же благодаря трехэлементной комбинаторной зависимости (открытие первого направляющего аппарата, угол разворота лопаток второго направляющего аппарата и угол разворота лопастей диагональной ступени) циркуляционные потери за диагональной лопастной системой на нерасчетных режимах сводятся к минимальным.

На рис. 4 представлена прогнозная универсальная характеристика радиально-диагональной гидротурбины РОД-400, построенная по методике разработанной авторами и приведенной выше. Для построения характеристики РОД 400 использованы универсальные характеристики рабочих колес: РО 310/1107-В-38,8 №3439 ХТЗ и ПЛД-90/2556а-В-45-46 №2561 ЛМЗ.



наглядно показывающие преимущества радиально-диагональной турбины.

Анализ преимуществ радиально-диагональной гидротурбины

Более сложная конструкция радиально-диагональной гидротурбины, а, следовательно, и более дорогое гидротурбинное оборудование (на 25-30%), а также большая величина заглубления свойственная диагональной гидротурбине (что не играет существенной роли для ГЭС на 400-600 м как правило подземного типа в скальной выработке) полностью оправдана теми преимуществами, которыми обладает РОД турбина, а именно:

1) КПД на оптимальном режиме работы для РОД-400 выше на 1%, чем у радиально-осевой турбины РО-400 и составляет $\eta_{\text{опт}}^{(\text{РОД}400)} = 91,4\%$;

2) среднеэксплуатационный КПД для РОД-400 на 2-5% выше, чем для радиально осевой турбины РО-400;

3) значительно увеличена пропускная способность по сравнению с радиально-осевой турбиной. На оптимальном режиме работы $Q_1^{(\text{РОД}400)} = 0,35 \text{ м}^3/\text{сек}$, а $Q_1^{(\text{РО}400)} = 0,2 \text{ м}^3/\text{сек}$ (рис. 5);

4) линия ограничения мощности для РОД-400 соответствует приведенному расходу $Q_1^{(\text{РОД}400)} = 0,5 \text{ м}^3/\text{сек}$, тогда как для РО-400 $Q_1^{(\text{РОД}400)} = 0,32 \text{ м}^3/\text{сек}$;

5) зона надежной и эффективной эксплуатации РОД-400 по напорам (величине n'_1) и расходам (Q'_1) существенно, в 1,5-1,7 раза шире, чем у радиально-осевой гидротурбины РО-400.

Зона надежной эксплуатации для РОД-400 $Q_1^{(\text{РОД}400)} = 0,17 - 0,52 \text{ м}^3/\text{сек}$, $n'_1^{(\text{РОД}400)} = 47 - 67 \text{ об/мин}$; для РО-400 $Q_1^{(\text{РО}400)} = 0,12 - 0,32 \text{ м}^3/\text{сек}$, $n'_1^{(\text{РО}400)} = 55 - 67 \text{ об/мин}$ (рис.4, 5);

б) при одном и том же диаметре рабочего колеса единичная мощность

радиально-диагональной турбины РО-400. гидротурбины РОД-400 на 50-70% выше, чем у турбины РО-400.

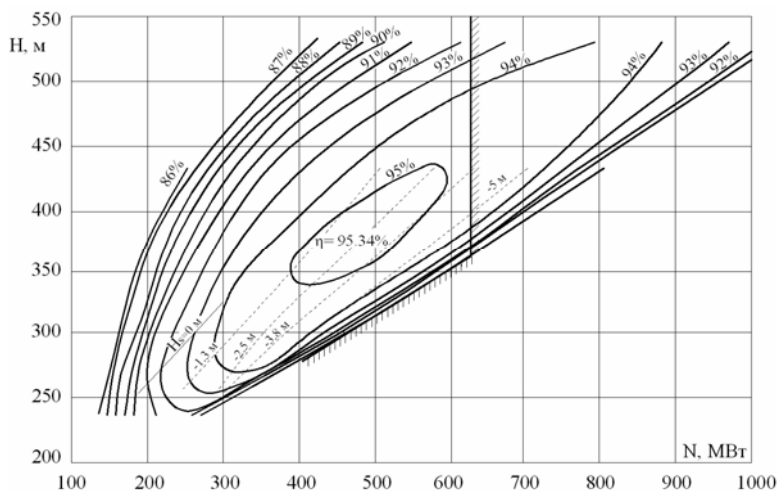


Рис. 6. Эксплуатационная характеристика РОД-400 ($D_1 = 4.5 \text{ м}$)

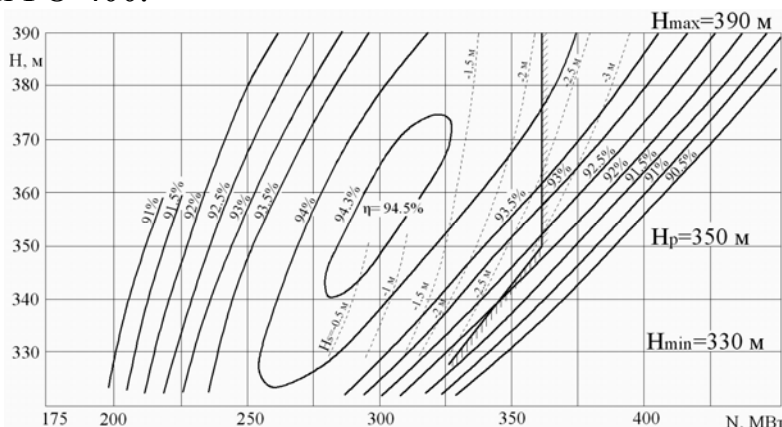


Рис. 7. Эксплуатационная характеристика РО-400/3515-В-450

При диаметре рабочего колеса $D_1 = 4.5$ м мощность гидротурбины РОД-400 на оптимальном режиме составляет $N^{(РОД400)} = 500$ МВт, а для радиально-осевой турбины РО-400 $N^{(РО400)} = 300$ МВт (рис. 6, 7).

Выводы

1. Зона надежной и эффективно эксплуатации РОД-400 по напорам (по величине n'_1) и расходам (Q'_1) существенно, в 1,5-1,75 раза шире, чем у гидротурбины РО-400.

2. При одном и том же диаметре рабочего колеса единичная мощность гидротурбины РОД-400 по крайней мере на 50-70% больше, чем радиально-осевой РО-400.

Список литературы: 1. *Varva M.N.* Aero-Termodinamics and flow in Turbomachines, New York, London-1969. 2. *Андреев В.Б., Бронковский Г.А., Веремеенко И.С.* «Справочник по гидротурбинам», Л. «Машиностроение», -1984. 3. *Ковалев Н.Н.* «Гидротурбины», Госиздат, научно-техническое машиностр. литературы, М.Л.-1961. 4. *Потетенко О.В., Дранковский В.Э., Ковалев С.М.* «Тенденции продвижения горизонтальных прямоточных и вертикальных радиально-осевых гидротурбин на высокие напоры с широким диапазоном эксплуатации», Вісник Сумського державного університету, Технічні науки, №3, -2010р.

Поступила в редколлегию 11.06.2012

УДК 674.047.3

І.М.ОЗАРКІВ, докт. техн. наук, проф., зав.каф., НЛТУ, Львів,
М.І. ДАНЧУК, асп., НТЛУ, Львів,
В.С.КОЗАР, асп., НТЛУ, Львів

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОСКОГО ГЕЛІОТЕРМІЧНОГО КОЛЕКТОРА

В роботі розкрито особливості будови плоского геліотермічного колектора. Наведено рівняння, що дозволяють розрахувати теплообмінні характеристики в процесі попадання сонячної енергії в геліоустановку.

Ключові слова: геліоколектор, адсорбер, прозоре покриття, температурне поле, теплоносій, потік, конвекція.

В работе раскрыты особенности строения плоского гелиотермического коллектора. Приведены уравнения, позволяющие рассчитать теплообменные характеристики в процессе попадания солнечной энергии в гелиоустановку.

Ключевые слова: гелиоколлектор, адсорбер, прозрачное покрытие, температурное поле, теплоноситель, поток, конвекция.

The work reveals the structural features of flat heliothermichnoho collector. An equationtha can calculate the heat transfer characteristics in the process of getting solar energyhelioustanovku.

Keywords: Heliocollector, adsorber, transparent cover, temperature field, coolant, flowconvection.

Відомо [1], що в теплових сонячних системах основним елементом є геліотермічний колектор, що перетворює енергію сонячного випромінювання в теплову енергію.

В сушильній техніці використовуються низькотемпературні плоскі колектори, коли температура теплоносія є меншою за 100°C . теплоносієм для передачі енергії може бути повітря, вода або незамерзаюча рідина (наприклад розчин гліколю і води в пропорції 1:1), а також солі кристалогідратів.

Основною вимогою, що ставиться до конструкції колектора – це найбільше поглинання сонячної енергії при найменшому відданні її в оточуюче середовище.

Основним елементом теплового плоского колектора є адсорбер (поглинаюча пластина), на якому відбувається термічна конверсія сонячного випромінювання (рис.1) і який є тепло сприймаючим елементом, що поглинає сонячне випромінювання і далі передає цю енергію теплоносію, що рухається в середині цього елемента. Зауважимо, що найбільш поширеними формами теплоприймаючих елементів є щільна (коли теплоносієм є повітря), трубка, листотрубка і трубка – ребриста.

До складу конструкції геліоколектора входять такі елементи:

- прозоре покриття (скло, поліетиленова плівка); що захищає адсорбер від теплових втрат в атмосферу і опадів та вітру;
- теплоізоляція (скло різної якості, полікарбонат);
- металевий або пластиковий короб;
- прямий та зворотній трубопроводи для переміщення теплоносія.

Відзначимо, що конструкція плоских геліоколекторів дозволяє використати пряме та розсіяне (дифузне) сонячне випромінювання. Такий колектор є досить простим за конструкцією і дешевим.

Прозорим покриттям найчастіше служить звичайне віконне скло із названим вмістом оксидів заліза. В останні роки часто вживають скло Diamat, Centros Solar Glas, в яких проникливість сонячного випромінювання відповідно становить 91% і 96% . перевагу надають склу, як прозорому матеріалу, через його міцність та дешевизну.

Абсорбер, як головний елемент сонячного колектора, виготовляється із металу, що має високий коефіцієнт теплопровідності (мідь, алюміній, латунь, полімерні матеріали та їх комбінації). Для підвищення поглинаючої здатності лицьова поверхня тепло сприймаючого елемента використовують як селективне (добре абсорбує тепло, хоча обмежує його емісію). Селективні покриття є результатом гальванічної пігментації чорним хромом (оксидом алюмінію, пігментованого нікелем). Хоча селективні покриття мають кращі показники і широко знайшли використання в сонячних колекторах, але на сьогодні вони є досить дорогими. З тильної сторони та по бокам адсорбер (тепло сприймаючий елемент) покривається шаром теплоізоляції (скляної вати, піноскла, азбестової ковсті, пінопласту, пінополіуретану тощо). В конструкціях сучасних геліоколекторів перевагу віддають пінополіуретану через його пористо-порожнинну структуру, яка не поглинає атмосферної вологи і надовго зберігає тепло ізолюючі властивості. Мінімальні теплові втрати до оточуючого середовища забезпечують теплоізований анодований алюмінієвий корпус. Для ущільнення швів та стиків використовують силіконову гуму.

Залежно від величин потреб в тепловій енергії або в гарячій воді визначають й необхідну кількість геліоколекторів.

Зазначимо, що проміжок між склом та тепло сприймаючою поверхнею коливається в межах 15...30мм.

Характер зміни температурних полів в колекторі залежить від конструкції тепло сприймаючої поверхні елемента.

На рис.2 показано переріз типового щілинного колектора для нагрівання повітря, а на рис.3 – схема експериментальної установки для визначення коефіцієнта сприймання сонячного випромінювання (в останньому випадку : 1- сонячний термічний колектор; 2- потенціометр; 3- радіометр; 4- бак-накопичувач підігрітого теплоносія; 5 - насос; 6 – витратомір; В1...В5 – вентилі).

Розподілення температурних полів геліоколекторів впливає на розподілення сонячної енергії в самому колекторі і залежить від конструкції тепло сприймаючого елемента. Відзначимо, що температура щілинного геліоколектора змінюється впоперек товщини колектора та вздовж руху самого теплоносія (вода, повітря, солей-кристалогідратів). При цьому сам характер зміни температури впоперек колектора буде залежати від характеру теплообміну із навколишнім середовищем (рис.4).

Автори роботи [1] пропонують свій метод розрахунку, який і розглянемо. Величина потоку, поглинаючого сонячного випромінювання тепло сприймаючою поверхнею елемента визначається

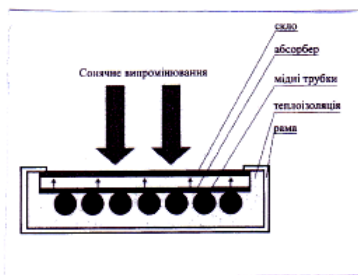


Рис. 1. Переріз конструкції плоского сонячного колектора з використанням трубок з теплоносієм

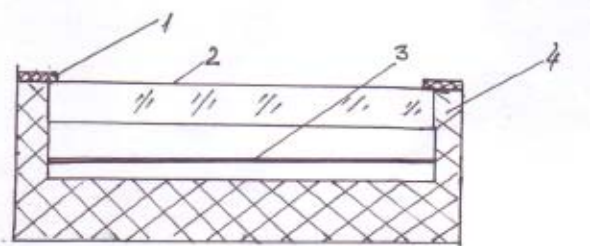


Рис.2. переріз плоского щілинного колектора: 1 - корпус; 2 – скло; 3 – адсорбер; 4- теплоізоляція

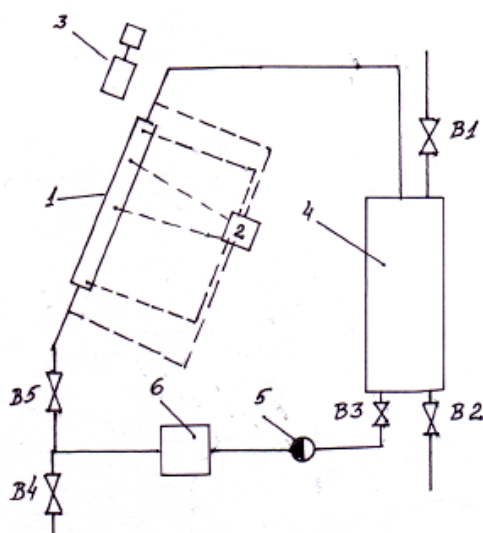


Рис. 3. Схема експериментальної установки

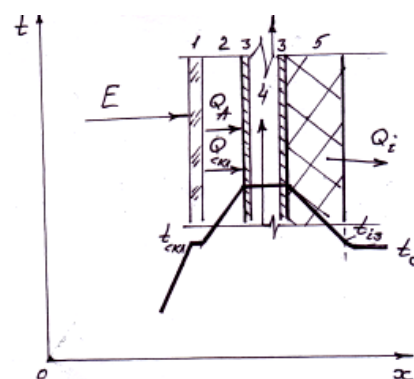


Рис. 4. Розподілення температур при проходженні сонячного випромінювання через щілинний колектор: 1-скло; 2-повітряний прошарок; 3-стінка тепло сприймаючого елемента; 4-теплоносій (вода, солі- кристалогідрати); 5-теплоізоляція

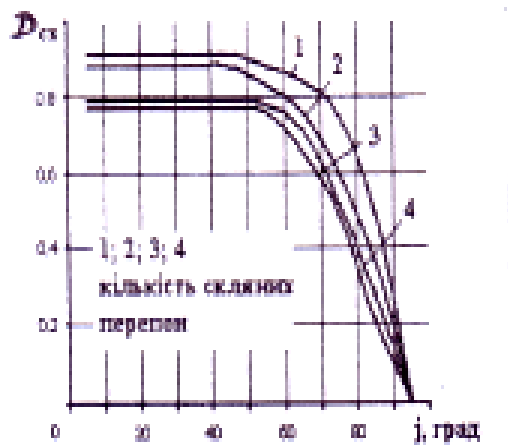


Рис.5. Законімірність зміни коефіцієнта пропускання променистої енергії склом у залежності від кута j падіння

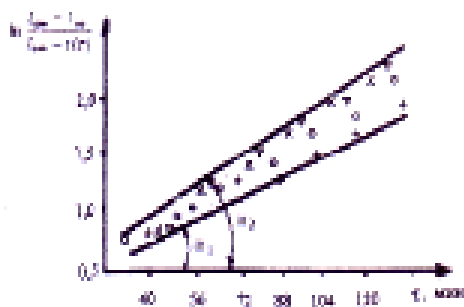


Рис.6. Узагальнення експериментальних даних:

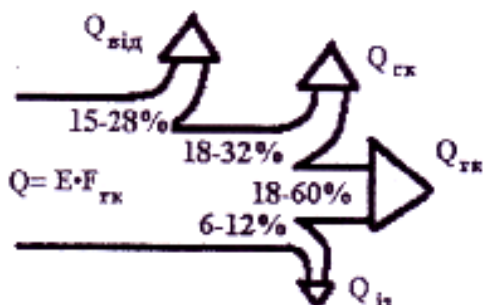


Рис.7. Розподіл енергії в геліоколекторі

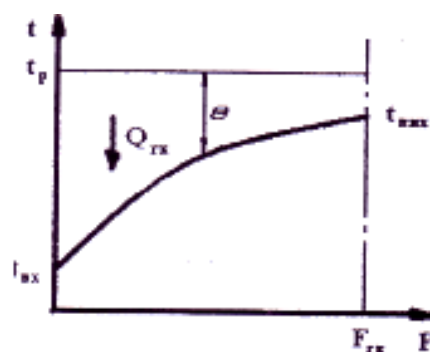


Рис.8. Характер розподілу температури теплоносія в ГК

$$Q_a = \gamma_a \cdot E \cdot F_{гк} \cdot K_{переш}, \quad (1)$$

де Q_a – поглинений потік, Вт;

γ_a – коефіцієнт сприймання сонячної радіації колектором;

E – інтенсивність падаючого потоку сонячного випромінювання, Вт/м²;

$F_{гк}$ – площа поверхні геліоколектора, м²;

$K_{переш}$ – середньодобовий коефіцієнт перерахунку сумарної (прямої і розсіювальної) сонячної енергії з горизонтальної поверхні на похилий геліоколектор.

Тепловий потік, що передається в оточуюче середовище колектора через скло, визначається:

$$Q_{скл} = K_{т,скл} (t - t_{н.с.}) \cdot F_{гк}, \text{ Вт}, \quad (2)$$

де $K_{т,скл}$ – коефіцієнт теплопередачі через скло, Вт/(м² · с⁰);

$t_{н.с.}$ – температура, оточуючого ГТЕ, середовища, с⁰;

t – температура зовнішнього повітря, с⁰

Величина теплового потоку, що пройшов через шар теплоізоляції, визначається:

$$Q_i = K_i (t - t_{н.с.}) \cdot F_{гк} \cdot k_{ст}, \text{ Вт}, \quad (3)$$

де K_i – коефіцієнт теплопередачі через шар теплоізоляції, Вт/(м² · с⁰);

$k_{ст}$ – коефіцієнт, який враховує теплоперехід через бокові стінки геліоколектора.

Кількість теплоти, яка надходить за рахунок теплоносія (солей-кристалогідратів або підігрітої води), визначається:

$$Q_{\text{Т.Н.}} = G_{\text{Т.Н.}} \cdot C_{\text{Т.Н.}} \cdot t_{\text{вх}}, \text{ Вт}, \quad (4)$$

де $G_{\text{Т.Н.}}$ – масова витрата теплоносія, кг/с;

$C_{\text{Т.Н.}}$ – питома теплоємність теплоносія, Дж/(кг · с⁰);

$t_{\text{вх}}$ – температура теплоносія на вході в трубу, с⁰.

Величина теплового потоку, що виноситься теплоносієм із геліоколектора, визначається як:

$$Q_{\text{вих.ГТЕ}} = G_{\text{ТН}} \cdot C_{\text{ТН}} \cdot t_{\text{вих}} \text{ Вт}, \quad (5)$$

де $t_{\text{вих}}$ – температура теплоносія на виході, с⁰.

Рівняння теплового балансу для елементарної площадки dF вздовж dy має вид

$$K_{\text{пер}} \cdot \gamma_a \cdot E \cdot B_{\text{ГК}} \cdot dy - K_{\text{ГК}} (t - t_{\text{н.с.}}) \cdot B_{\text{ГК}} \cdot dy - G_{\text{ТН}} \cdot C_{\text{ТН}} \frac{dt}{dy} \cdot dy = 0 \quad (6)$$

де $K_{\text{ГК}}$ ($K_{\text{ГК}} = K_{\text{скл}} + k_{\text{ст}} \cdot K_{\text{ізол.}}$) – коефіцієнт тепловтрат геліоколектора, Вт/(м²·с⁰);

$B_{\text{ГК}}$ – ширина колектора, м;

dF ($dF = B_{\text{ГК}} \cdot dy$) – площа елементарної ділянки колектора, м².

Рівняння (6) можна записати:

$$\frac{dt}{dy} + \frac{K_{\text{ГК}} \cdot B_{\text{ГК}}}{G_{\text{ТН}} \cdot C_{\text{ТН}}} \cdot t - \frac{B_{\text{ГК}} (\gamma_a \cdot E \cdot K_{\text{пер}} + K_{\text{ГК}} \cdot t_{\text{н.с.}})}{G_{\text{ТН}} \cdot C_{\text{ТН}}} = 0 \quad (7)$$

Розв'язок цього рівняння має вид

$$t = \frac{\gamma_a}{K_{\text{ГК}}} \cdot E \cdot K_{\text{пер}} + t_{\text{н.с.}} + D \cdot \exp(-y), \quad (8)$$

де D – постійна інтегрування (константа), величина якої буде визначатися граничними (крайовими) умовами виду: $y = 0$; $t = t_{\text{вих}}$

Значення D

$$D = t_{\text{вих}} - \frac{\gamma_a}{K_{\text{ГК}}} \cdot E \cdot K_{\text{пер}} - t_{\text{н.с.}} \quad (9)$$

Підставивши значення D в рівняння (8), отримаємо рівняння виду

$$t = \frac{\gamma_a}{K_{\text{ГК}}} \cdot E \cdot K_{\text{пер}} + t_{\text{н.с.}} - \left(\frac{\gamma_a}{K_{\text{ГК}}} \cdot E \cdot K_{\text{пер}} + t_{\text{н.с.}} - t_{\text{вих}} \right) \cdot \exp(-y) \quad (10)$$

Із рівняння (10) видно, що зміна температури вздовж колектора має експоненціальний характер і набуває максимального значення на виході із колектора. При цьому зниження витрати теплоносія веде до підвищення температури вздовж самого колектора (якого витрата теплоносія рівна нулю, то вся поглинена енергія віддається у вигляді тепла навколишньому середовищу кругом ТСЕ, тобто настає рівновага).

Рівноважна температура при певній інтенсивності (густині) сонячного випромінювання представлена авторами [1] виразом

$$t_p = \frac{\gamma_a}{K_{\text{ГК}}} \cdot E \cdot K_{\text{пер}} + t_{\text{н.с.}} \quad (11)$$

Наведені рівняння в роботі [1] мають дуже складний характер і пов'язані вони із параметрами, що залежать, в свою чергу, від інших факторів. Це вимагає розробка більш спрощених методів розрахунку температурних полів.

Зокрема, в нашій роботі [2] наведено методику розрахунку теплових полів в геліосушарці тепличного (парникового) типу, де має місце комбіноване (конвективно-радіаційне) сушіння.

Теплові надходження, що поступають через прозорі світлові отвори, визначаються за формулою

$$Q = q_{\text{ш}} \cdot F_{\text{ш}} \quad \text{Вт}, \quad (12)$$

де $q_{\text{ш}}$ – питомий тепловий потік, що поступає в тепло сприймаючий простір, тобто 1 м^2 освітленого Сонцем скла; $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}^0)$;

$F_{\text{ш}}$ – площа, освітлена Сонцем просвіту, м^2

Відомо [3], що максимальні значення питомого теплового потоку $q_{\text{ш}}$ залежать від розрахункової географічної карти (місця встановлення геліоустановки, тобто регіону), орієнтації геліоустановки стосовно сторін світу.

У випадку вертикального розміщення прозорої стінки, який повністю або частково опромінюється сонячним випромінюванням, загальний (сумарний) тепловий потік визначається

$$q_{\text{ш}} = (q_{\text{пр}} + q_{\text{розс.}}) \cdot k_{\text{з.а.}} \cdot k_{\text{скл}} \cdot k_{\text{с.п}}, \quad (13)$$

де $q_{\text{пр}}$ – максимальний прямий (направлений) потік сонячного випромінювання, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

$q_{\text{розс.}}$ – питомий розсіяний (дифузний) потік сонячного випромінювання, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

$k_{\text{з.а.}}$ – коефіцієнт, що враховує забруднення атмосфери ($k_{\text{з.а.}} = 0,8$ – для промислових районів; $k_{\text{з.а.}} = 1,0$ для курортної зони; $k_{\text{з.а.}} = 1,1$ – для гірських районів);

$k_{\text{скл}}$ – коефіцієнт, що враховує забруднення скла (при ледве помітному запиленні $k_{\text{скл}} = 0,8 \dots 0,9$; при значному запиленні $k_{\text{скл}} = 0,5 \dots 0,7$);

$k_{\text{с.п}}$ – коефіцієнт пропускання сонячної енергії склом залежно від кількості скляних перепон та кута падіння променів, тобто кута між променем Сонця і нормаллю до поверхні колектора або прозорої стінки (рис.5).

Відомо [3], що величина q_{Σ} , який падає на 1 м^2 нахиленої поверхні сонячного колектора в кожну годину безхмарного дня визначається

$$q_{\Sigma} = q_{\text{пр}} \cdot \frac{\cos(\gamma - S) \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin(\gamma - S) \cdot \sin \delta}{\cos \gamma \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \gamma \cdot \sin \delta} + q_{\text{розс.}}; \quad (14)$$

де S – кут нахилу площини сонячного колектора до горизонту ($S = 30 \dots 50^0$);

γ – кут схилення (широти місцевості, для м.Львів $\gamma = 50^0$);

ω – часовий кут, який в полудень рівний нулю, коли колектор орієнтований на південь.

Зазначимо, що через кожну годину значення ω змінюється на 15^0 зі знаком «+» (від ранку до 12 годин дня) і знаком «-» (від 12 години дня і до вечора).

Величина теплового потоку, що поєднує в навколишнє середовище, пройшовши через скло, визначається

$$Q_{\text{скла}} = \sigma_0 \cdot \epsilon_{\text{скл}} \cdot \left(\frac{T_{\text{скл}}}{100}\right)^4 \cdot F_{\text{скл}}, \text{Вт} \quad (15)$$

де σ_0 – постійна Стефана-Больцмана (в інженерних розрахунках $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) = 5,67 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{К})$);

$\epsilon_{\text{скл}}$ – ступінь чорноти скла, яка залежить від стану поверхні ($\epsilon_{\text{скл}} = 0,93 \dots 0,94$ – для скла із гладкою поверхнею);

$T_{\text{скл}}$ – температура поверхні скла, К;

$F_{\text{скл}}$ – площа поверхні скла.

Коефіцієнт пропускання променевої енергії склом залежить від якості скла, його товщини та кута, під яким сонячний промінь падає на саму поверхню скла.

У випадку, коли сонячне проміння падає перпендикулярно до поверхні скла ($j=0^\circ$), то коефіцієнт пропускання D_λ можна визначати за формулою:

$$D_\lambda = \exp(-U \cdot \delta_{\text{скл}}), \quad (16)$$

де U – значення лінійного коефіцієнта (показника) поглинання сонячного випромінювання (для віконного скла $U = 30 \text{ м}^{-1}$).

Залежність коефіцієнта пропускання променевої енергії склом $D_{\text{скл}}$ від кута падіння j (кута між напрямом сонячного променя і нормаллю до поверхні колектора) наведено на рис.5. Із даного рисунку видно, що різне зниження коефіцієнта пропускання сонячних променів має місце тільки при великих кутах j , тобто коефіцієнт $D_{\text{скл}}$ залежить від ранкової та вечірньої пори (в дану пору дня інтенсивність сонячного випромінювання із середньоденним її значенням).

Зазначимо, що співвідношення між направленою (прямою) і дифузійною (розсіяною) складовими змінюється на протязі залежно від регіону України. Зокрема, в ранкові та вечірні години основною часткою сонячного випромінювання є дифузійне. При великих кутах падіння ($j = 65 \dots 90^\circ$) зниження коефіцієнта пропускання променевої частки енергії не спостерігається. Тому, при теплових розрахунках геліосистем вважають, що коефіцієнт пропускання променевої енергії скла не залежить від кута опромінення сонячного колектора і це не вносить помітної похибки, що стосується конвективної складової теплового потоку, то при розрахунку теплообміну між геліоколектором і навколишнім середовищем дотримуються принципу суперпозиції, згідно якого кожен вид теплообміну (теплопровідністю, вільною або вимушеною конвекцією, тепловим випромінюванням) розраховується незалежно один від одного, а потім теплові потоки підсумовуються, це дозволяє складний процес теплообміну розкласти на прості складові і кожну з них обчислити окремо.

В зв'язку з тим, що кожний із вище вказаних видів теплообміну залежить від значення температури (останнє є результатом дії всього складного процесу теплообміну), то метод розрахунків базується на використанні ітерацій.

Як правило, при проектувальних розрахунках вибирають найбільш ймовірні умови роботи сонячного колектора і приймають їх за незмінні (постійні) величини, а теплофізичні властивості матеріалів, з яких виготовляється колектор, як такими, що не залежать від температури.

Це значить, що контактними термічними опорами

$$(R_t = \frac{1}{\lambda_{\text{вн}}} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\lambda_{\text{зов}}} \cdot \frac{m^2 \cdot c}{Bm},) \text{ з обох боків теплоізоляційного шару нехтують.}$$

Променевий теплообмін між двома тілами виражають через променевий коефіцієнт тепловіддачі [2,3], який визначають за формулою

$$\lambda_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{пр}}}{F(T_2 - T_1)} \cdot \frac{Bm}{m^2 \cdot K}, \quad (17)$$

де $Q_{\text{пр}}$ - величина променевого потоку, Вт;

T_1, T_2 – абсолютні температури тіл, К;

F – поверхня променевого теплообміну, м^2 .

$$Q_{\text{пр}} = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_0 \cdot \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] \text{ Вт}, \quad (18)$$

де $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведена (осереднена, інтегральна) ступінь чорноти двох тіл, що беруть участь в теплообміні ($\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$)

В реальних умовах роботи плоских колекторів, коли $0,90 \leq \frac{T_2}{T_1} \leq 1,1$, користуються середнім значенням температури, тобто

$$T_{\text{сер}} = \frac{T_1 + T_2}{2}, \text{ К} \quad (19)$$

Це значить, що в інженерних розрахунках коефіцієнт променевого теплообміну визначається за формулою

$$\alpha_{\text{пр}} = 0,227 \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \left(\frac{T_1 + T_2}{200} \right)^3, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (20)$$

Як показали розрахунки [1] визначення $\alpha_{\text{пр}}$ за даною формулою мають похибку не більш ніж 1%.

Конвективну складову в проміжку між склом і теплосприймаючою поверхнею елемента (ТСЕ) можна розрахувати як для рідинного прошарку [4], тобто

$$q_{\text{конв}} = \eta_{\text{к.пр.}} \cdot (T - T_{\text{скл}}) = \alpha_{\text{к.пр.}} \cdot (T - T_{\text{скл}}), \quad (21)$$

де α – коефіцієнт теплопровідності повітря при певних температурах $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

- товщина проміжку (прошарку) між склом і ТСЕ, м;

$\eta_{\text{к.пр.}}$ – коефіцієнт, що враховує збільшення теплопровідності проміжку (прошарку) за рахунок вільної конвекції.

$\alpha_{\text{к.пр.}}$ – коефіцієнт тепловіддачі (теплообміну) в прошарку який визначається :

$$\alpha_{\text{к.пр.}} = \eta_{\text{к.пр.}} \cdot \frac{\lambda_{\text{нов}}}{\delta_{\text{пром}}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (22)$$

Для геліоколекторів, в яких має місце вільна конвекція, значення $\eta_{\text{к.пр.}}$ вибирають залежно від добутку ($\text{Gr} \cdot \text{Pr}$),

де Gr – критерій Грасгофа, Pr – критерій Прандтля.

У випадку, коли $(\text{Gr} \cdot \text{Pr}) > 10^3$ (що має місце завжди в геліоколекторах) значення $\eta_{\text{к.пр.}}$ визначається

$$\eta_{\text{к.пр.}} = 0,18 (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{0,25}, \quad (23)$$

де критерій Грасгофа знаходять за формулою:

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot \delta_{\text{пр}}^3 \cdot (T - T_{\text{скл}})}{\nu_{\text{нов}}^2 \cdot T}, \quad (24)$$

а критерій Прандтля визначається

$$\text{Pr} = \frac{\nu_{\text{нов}}}{\alpha_{\text{нов}}}, \quad (25)$$

де $\nu_{\text{нов}}$, $\alpha_{\text{нов}}$ – відповідно коефіцієнти кінематичної в'язкості ($\text{м}^2/\text{с}$) і температуропровідності ($\text{м}^2/\text{с}$), які вибираються за теплофізичними

властивостями залежно від температури (в кожному випадку середньої температури).

Наближено значення коефіцієнта конвективного теплообміну між склом і прошарком до поверхні ТСЕ визначається

$$\alpha_{\text{к.пр.}} = 1,94 \sqrt{\frac{T - T_{\text{скл}}}{\delta_{\text{пр}} \cdot T}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (26)$$

Конвективний теплообмін між зовнішньою поверхнею геліоколектора та навколишнім повітрям, що оточує сам колектор може здійснюватися як вільною конвекцією, так і вимушеною конвекцією за рахунок вентиляторів, що встановлені в геліоустановці.

При змішаній конвекції (вільній та вимушеній) важливо враховувати у тому випадку, коли колектор безпосередньо контактує з навколишнім зовнішнім атмосферним повітрям тобто він буде залежати від безвітряної чи вітряної погоди (швидкості вітру).

При вільній конвекції коефіцієнт тепловіддачі визначається з рівняння, що враховує турбулентний рух, коли $(Gr \cdot Pr) > 10^9$, тобто

$$Na = 0,15 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,33}, \quad (27)$$

де $Na = \frac{\alpha_{\text{к-н.п.}} \cdot L_{ГК}}{\alpha_{\text{нов}}}$ – критерій Нуссельта.

Наближено, автори [1] рекомендують визначати за формулою:

$$\alpha_{\text{к-н.п.}} \approx 1,83 \sqrt[3]{T - T_{\text{н.с.}}} \quad (28)$$

В роботі [3] наведено рівняння для визначення коефіцієнта конвективного теплообміну такі:

а) для вертикальних стінок (поверхонь огорожень)

$$\alpha_{\text{к.верт.}} = 2,52 \sqrt[4]{(t_{\text{нов}} - t_{\text{п.з.}})} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}, \quad (29)$$

б) горизонтальних поверхонь

$$\alpha_{\text{к.гор.}} = 3,25 \sqrt[4]{(t_{\text{нов}} - t_{\text{п.з.}})} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}, \quad (30)$$

де $t_{\text{п.з.}}$ - температура повітря в робочій зоні, $^\circ\text{С}$.

При турбулентному обдуванні плоскої пластини автори [1] для визначення коефіцієнта пропонують використовувати формулу

$$\alpha_{\text{к.н.с.}} \approx 5,30 \cdot \omega^{0,80} \quad (31)$$

Коефіцієнти тепловіддачі від агента обробки (сушіння, нагрівання) до внутрішньої поверхні огорожень геліоустановки α_1 коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні установки в оточуюче середовище розраховується за формулою:

$$\alpha = (5,3 + 1,6 \cdot \omega) \cdot 1,163 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}, \quad (32)$$

де ω – швидкість повітря, для оточуючого середовища геліоустановки

$\omega = 0,5 \dots 0,7$ м/с, а в середині установки визначається заданою (проектною) швидкістю.

Теплові втрати із тильного боку геліоколектора визначається термічним опором ізоляції і термічним опором поглинаючого шару навколишнього повітря. В зв'язку з тим, що термічний опір ізоляції є набагато більшим за термоопір

зовнішнього повітря ($\frac{\delta_{i3}}{\lambda_{i3}} \gg 1/(\alpha_{\text{к.н.с.}} + \alpha_{\text{гр}})$), то термоопором повітря нехтують і припускають, що температура зовнішньої поверхні ізоляції рівна температурі навколишнього середовища. Це значить, що коефіцієнт теплопередачі ізоляції визначається:

$$k_{i3} = \lambda_{i3} / \delta_{i3} \quad (33)$$

Практика розрахунків свідчить [1], що для визначення коефіцієнта теплопередачі (теплових втрат) на початку розрахунків можна прийняти

$$K_{\text{ГК}} = 3,5 \cdot k_{i3} \cdot k_f, \quad (34)$$

де k_f – коефіцієнт, що враховує збільшення поверхні теплообміну.

У випадку, коли частка теплової енергії відбувається теплоносієм, що протікає через нього, автори [1] рекомендують приймати за розрахункову температуру середню інтегральну температуру вздовж ТСЕ, тобто

$$T_{\text{с.р.}} = T_p + (T_p - T_{\text{вх}}) \frac{G_{\text{ТН}} \cdot C_{\text{ТН}}}{K_{\text{ГК}} \cdot F_{\text{ГК}}} \left(e^{\frac{K_{\text{ГК}} \cdot F_{\text{ГК}}}{G_{\text{ТН}} \cdot C_{\text{ТН}}}} - 1 \right) \quad (35)$$

Слід зазначити, що зміна умов роботи геліотермічного колектора приводить до зміни величин теплових потоків із лицьової сторони, що викликає деякі зміни коефіцієнта теплових втрат.

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі (теплообміну) при вимушеній конвекції в середині геліоустановки можна визначити формулу м.о. Міхеєва [4], тобто

$$\cdot \text{коли } Re < 10^5 \quad \alpha_f = 0,66 Re^{0,50} \cdot \frac{\lambda_f}{L} \quad \text{або } Na_f = 0,66 Re^{0,50} ; \quad (36)$$

$$\cdot \text{коли } Re > 10^5 \quad \alpha_f = 0,032 Re^{0,80} \cdot \frac{\lambda_f}{L} \quad \text{або } Na_f = 0,032 Re^{0,80} ; \quad (37)$$

де Re ($Re = \omega_{\text{нов}} \cdot \frac{L_{\text{ГК}}}{V_{\text{нов}}}$) – критерій Рейнольдса.

Таким чином, наведені вище джерела дозволяють визначити складові теплових потоків як в колекторі, так і в геліоустановці в цілому.

Список літератури: 1. Теплові розрахунки геліосистем : Монографія / Сивораки В.Ю., Марков В.П., Пентров Б.Є., Золотько К.Є., Стаценко І.М. - Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетр. Ук-ту, 2003.-132с. 2. Озарків І.М., Мисак Й.С., Копинець З.П. Використання сонячної енергії у промисловості . – Львів: НВФ «Українські технології», 2008.-276с. 3. Застосування сонячної енергії у житловому господарстві та деревообробці: Наук. видання / Озарків І.М., Мисак Й.С., Криницький Г.Т., Максимів В.М., Копій Л.І., Соколовський І.А., Озарків О.І., Козар В.С. – Львів: НВФ «Українські технології», 2012.-338с. 4. Теплові процеси деревообробки : Навч. посібник / Озарків І.М., Білей П.В., Максимів В.М., Соколовський І.А., Сорока Л.Я., Ацбергер Й.Л. – Львів: РВВ НЛТУ України, 2008. – 264с.

Поступила в редколлегию 11.06.2012

УДК 661.183.7

О.І. КОСЕНКО, канд. хім. наук, доц., НАУ, Київ,
А.Д. КУСТОВСЬКА, канд. хім. наук, доц., НАУ, Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ МОДИФІКУВАННЯ СТРУКТУРИ ФЕРОСИЛКАГЕЛІВ

Досліджено закономірності термічного та гідротермального модифікування пористої структури та фазового складу спільноосаджених феросилікагелів з різним співвідношенням $\text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2$. Результати пояснені спільною дією процесів масопереносу і фазових перетворень, а також взаємним впливом компонентів на ці процеси.

Ключові слова: феросилікагель, пориста структура, гідротермальне модифікування, термообробка.

Исследовано закономерности термического и гидротермального модифицирования структуры и фазового состава соосажденных ферросиликагелей с разным соотношением $\text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2$. Результаты объяснены совместным действием процессов массопереноса и фазовых превращений, а также взаимным влиянием компонентов на эти процессы.

Ключевые слова: ферросиликагель, пористая структура, гидротермальное модифицирование, термообработка.

Laws of thermal and hydrothermal modification of porous structure and phase composition of jointly precipitated iron-silica gels with various proportion of $\text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2$ was investigated. The results were explained by combined action of mass transport and phase transformations and mutual influence of components on this processes.

Keywords: iron-silica gel, porous structure, hydrothermal modification, thermal processing.

1. Вступ

Створення неорганічних пористих високодисперсних матеріалів з заданими складом та властивостями є однією з важливих проблем адсорбції і каталізу, адже найбільш важливими факторами, які визначають природу синтезованих композицій при використанні їх в якості високоефективних і селективних сорбентів, іонообмінних матеріалів і носіїв каталітично-активних речовин, є параметри їх пористої структури, фазовий та хімічний склад.

Розмаїття каталітичних процесів в різних галузях хімічної технології вимагає великої кількості різних за пористою структурою та хімією поверхні каталізаторів і їх носіїв [1].

2. Аналіз досліджень та публікацій

Одним із найбільш поширених носіїв каталізаторів є силікагель завдяки його економічності, інертності і великим можливостям регулювання пористої структури. Крім створення заданої пористості носія, важливим є також надання його поверхні необхідних кислотно-основних властивостей. Цю задачу можна вирішити створенням бінарних оксидно-гідроксидних систем на основі силікагелю.

Синтезу бінарних кремнійвмісних пористих матеріалів присвячено чимало робіт, в яких розглянуто системи, до складу яких разом з оксидом кремнію входять оксиди алюмінію, заліза, титану, цирконію, олова, магнію, хрому та інших металів [2-4], але в цих роботах основна увага приділяється вирішенню якоїсь конкретної, вузької задачі - знаходженню умов синтезу, впливу складу на пористу структуру, зміні структури під впливом певних факторів.

Відомо, що пористу структуру сорбентів можна змінювати як на стадіях синтезу, так і різними методами обробки готового гідрогелю або ксерогелю, при чому другий підхід дає більш широкі можливості модифікування структури. Найбільш ефективними методами модифікування є гідротермальний та термічний [5]. Закономірності гідротермального формування структури повніше вивчені для силікагелю [6]. Головною особливістю оксидів металів, що відрізняє їх від кремнезему, є можливість перебігу процесів кристалізації при термічній або гідротермальній обробці, що призводить до специфічного характеру змін пористої структури. Цим пояснюється інтерес до комплексних досліджень впливу модифікування не тільки на пористість, але й на фазовий склад та дисперсність бінарних спільноосаджених систем, що відкривають шляхи до розуміння механізмів процесів перебудови каркаса пористого матеріалу і синтезу носіїв потрібної структури і кристалічності.

3. Постановка завдання

Метою роботи є розробка умов синтезу спільноосаджених феросилікагелів з різним співвідношенням Fe_2O_3 : SiO_2 та вивчення закономірностей їх гідротермального і термічного модифікування для створення алгоритму синтезу цих систем з наперед заданими параметрами пористої структури, фазовим та хімічним складом, а також ступенем дисперсності кристалічних фаз.

4. Експериментальні дані та їх обговорення

Вихідні зразки спільноосаджених феросилікагелів були отримані додаванням 1М розчину Na_2SiO_3 до 1М розчину FeCl_3 при інтенсивному перемішуванні до значення $\text{pH}=9$. Вибір pH визначався з урахуванням повноти осадження металу (у вигляді гідроксиду) та умовами осадження кремнезему (SiO_2) у вигляді щільного осаду. Для досягнення потрібного pH до розчину солі додавали розчин HCl , а до розчину силікату натрію – розчин NH_4OH . Отримані осад промивали дистильованою водою до відсутності якісних реакцій на іон амонію (з реактивом Неслера) та хлорид-іон (з нітратом срібла). Осад віджимали на фільтрі і отримували вологу пасту (гідрогель), після сушки якого при кімнатній температурі отримували ксерогель. Хімічний склад зразків визначали методом вагового аналізу SiO_2 . За цією методикою були синтезовані зразки феросилікагелів з вмістом Fe_2O_3 8, 40, 60, 80 % мас.

Гідротермальну обробку (ГТО) зразків проводили в стальних автоклавах з тефлоновими вкладишами при температурах 373, 473, 573 та 673 К протягом 6 годин. В автоклав додавали дистильовану воду в кількості, необхідній для отримання тиску насичених парів при даній температурі (373 К – 1 атм, 473 К – 15 атм, 573 К – 85 атм, 673 К ~ 200 атм).

Параметри пористої структури зразків – питома поверхня (S), граничний сорбційний об'єм пор (V_S) і діаметр пор (d) - розраховувались із ізотерм адсорбції

метанолу за методом БЕТ, сумарний об'єм пор (V_{Σ}) визначався методом просочування [7,8].

Результати впливу ГТО на пористість гідрогелів та ксерогелів з різним співвідношенням $\text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2$ представлені в таблиці 1.

Таблиця 1- Вплив умов ГТО на пористу структуру феросилікагелів

Fe_2O_3 , % мас.	Т, К	ГТО (ксерогель)				ГТО (гідрогель)			
		S , $\text{м}^2/\text{г}$	V_S , $\text{см}^3/\text{г}$	V_{Σ} , $\text{см}^3/\text{г}$	d , $\text{\AA}$	S , $\text{м}^2/\text{г}$	V_S , $\text{см}^3/\text{г}$	V_{Σ} , $\text{см}^3/\text{г}$	d , $\text{\AA}$
8	Вихід- ний	582	1,01	1,25	86	582	1,01	1,25	86
	373	456	0,82	1,33	117	469	1,08	1,46	125
	473	226	0,45	1,24	219	156	0,51	1,62	415
	573	70	0,14	0,36	206	89	0,40	1,38	620
	673	19	0,07	0,30	630	17	0,18	2,49	5860
40	Вихід- ний	366	0,34	0,72	79	366	0,34	0,72	79
	373	455	0,44	0,85	75	481	0,45	0,71	58
	473	358	0,42	0,90	101	428	0,44	0,65	61
	573	231	0,42	0,83	144	185	0,37	0,52	112
	673	102	0,41	0,82	322	78	0,21	2,12	1080
60	Вихід- ний	392	0,22	0,37	38	392	0,22	0,37	38
	373	433	0,29	0,45	42	427	0,45	0,49	46
	473	301	0,32	0,32	43	247	0,31	0,32	52
	573	177	0,33	0,32	72	119	0,40	1,82	612
	673	73	0,32	0,36	197	41	0,23	0,97	946
80	Вихід- ний	396	0,31	0,32	32	396	0,31	0,32	32
	373	393	0,31	0,34	35	390	0,35	0,36	37
	473	208	0,32	0,35	67	107	0,64	0,83	310
	573	77	0,37	0,33	171	68	0,33	1,25	736
	673	49	0,35	0,38	310	42	0,31	1,08	1020
100	Вихід- ний	290	0,22	0,22	30	290	0,22	0,22	30
	373	270	0,27	0,26	39	277	0,25	0,25	36
	473	23	0,17	0,18	313	64	0,19	0,19	119
	573	17	0,23	0,24	564	29	0,14	-	-
	673	24	0,22	0,22	364	44	0,11	-	-

Аналіз даних таблиці показує, що найбільшу величину питомої поверхні, граничного сорбційного і сумарного об'єму пор має вихідний феросилікагель з 8% Fe_2O_3 . Для вихідних зразків інших складів величина питомої поверхні приблизно однакова і лежить в межах 360 – 390 $\text{м}^2/\text{г}$, суттєво меншими є величини сорбційного і сумарного об'єму пор, а також діаметра пор.

В результаті ГТО як ксерогелів, так і гідрогелів при збільшенні температури і тривалості обробки спостерігаються загальні тенденції до зменшення величини питомої поверхні та збільшення діаметра пор, незначних змін величини граничного сорбційного об'єму пор, і різний характер зміни сумарного об'єму пор: якщо для ксерогелю зміни V_{Σ} коливаються в невеликих межах, то при обробці гідрогелю сумарний об'єм пор збільшується в 2-3 рази і більш суттєво збільшується діаметр пор. Для зразка з невеликим вмістом заліза (8% Fe_2O_3) спостерігаються найбільші зміни параметрів пористої структури як при ГТО ксерогелю, так і гідрогелю.

Для більш повного з'ясування особливостей гідротермального модифікування феросилікагелів була проведена термічна обробка ксерогелів в аналогічних умовах: при температурах 373, 473, 573 та 673 К протягом 6 годин. Результати представлені в таблиці 2.

Таблиця 2- Вплив умов ТО на пористу структуру феросилікагелів

Fe_2O_3 , % мас.	T, К	S, м ² /г	V_s , см ³ /г	V_{Σ} , см ³ /г	d, Å
8	Вихідний	582	1,01	1,25	86
	373	456	1,05	1,29	113
	473	361	0,94	0,98	109
	573	308	1,2	1,12	145
	673	250	0,83	0,90	144
40	Вихідний	366	0,34	0,72	79
	373	367	0,35	0,88	74
	473	286	0,30	0,60	84
	573	244	0,29	0,44	72
	673	226	0,26	0,53	94
60	Вихідний	392	0,22	0,37	38
	373	356	0,27	0,25	28
	473	258	0,22	0,24	37
	573	240	0,29	0,33	55
	673	202	0,20	0,24	48
80	Вихідний	396	0,31	0,32	32
	373	336	0,28	0,25	30
	473	254	0,28	0,24	38
	573	202	0,27	0,29	57
	673	191	0,26	0,27	57
100	Вихідний	290	0,22	0,22	30
	373	259	0,26	0,25	30
	473	198	0,26	0,25	51
	573	155	0,25	0,24	62
	673	45	0,20	0,20	178

Як видно з таблиці, зі збільшенням температури ТО для всіх зразків відбувається монотонне зменшення величини питомої поверхні, а також невелике

зменшення граничного сорбційного об'єму пор і сумарного об'єму пор, що супроводжується незначним збільшенням діаметра пор. Це свідчить про те, що в плані регулювання пористої структури феросилікагелів термообробка є менш ефективною, ніж гідротермальна: так, при ГТО величина питомої поверхні зменшується в 6-10 разів, а при ТО – в 1,5-2 рази.

Було досліджено також комбінацію методів ТО і ГТО на модифікування пористої структури феросилікагелів: в першій серії дослідів проводили спочатку ТО зразків при температурах 373, 473, 573 та 673 К протягом 6 годин, а потім їх ГТО, а в другій серії – навпаки: гідротермально оброблені при різних температурах зразки проходили термічну обробку. Отримані результати свідчать, що домінуючим фактором, що визначає характер змін пористої структури феросилікагелів, є ГТО: загальні закономірності зміни текстури в умовах ГТО зберігаються і для попередньо термічно оброблених зразків - величина питомої поверхні зменшується, а середній діаметр пор збільшується приблизно на порядок, в той час як величини граничного сорбційного об'єму пор і сумарного об'єму пор змінюються незначно.

Для пояснення змін, які відбуваються при ГТО феросилікагелів, недостатньо враховувати лише процеси розчинення-осадження колоїдних часток та поверхневої дифузії, адже в гідротермальних умовах можуть відбуватися фазові перетворення як чистих компонентів, так і нових сполук, що утворюються при ГТО. Тому в роботі проведено дослідження фазового складу феросилікагелів з різним співвідношенням компонентів методом рентгено-фазового аналізу (РФА). Дифрактограми зразків реєстрували на дифрактометрі ДРОН-3М з використанням мідного K α випромінювання та Ni фільтра. Результати представлені в таблиці 3.

Таблиця 3- Вплив умов ГТО на фазовий склад феросилікагелів

T, K	Fe ₂ O ₃ 8 % мас.	Fe ₂ O ₃ , 40 % мас.	Fe ₂ O ₃ , 60 % мас.	Fe ₂ O ₃ , 80 % мас.
ГТО (ксерогель)				
Вихідний	аморфний	аморфний	аморфний	аморфний
373	аморфний	аморфний	аморфний	аморфний
473	аморфний	аморфний	аморфний	гематит
573	аморфний	аморфний	гематит	гематит
673	акміт + α - кристобаліт	гематит	гематит	гематит
ГТО (гідрогель)				
Вихідний	аморфний	аморфний	аморфний	аморфний
373	аморфний	аморфний	аморфний	аморфний
473	аморфний	аморфний	гематит	гематит
573	аморфний	гематит	гематит	гематит
673	акміт + α - кристобаліт	гематит + α - кристобаліт	гематит	гематит

Дані РФА показують, що всі вихідні зразки, а також термічно оброблені є рентгеноаморфними, в той час як ГТО і ксерогелів, і гідрогелів призводить до появи в них кристалічних фаз, при чому в аналогічних умовах ступінь кристалізації гідрогелів з 40–80 % мас. Fe_2O_3 вищий, ніж відповідних ксерогелів, а фазовий склад продуктів ГТО феросилікагелів залежить від співвідношення компонентів в системі: зразок з 8% Fe_2O_3 кристалізується в α -кристобаліт (SiO_2) і акміт ($\text{NaFeSi}_2\text{O}_6$), при збільшенні вмісту заліза в зразках на дифрактограмах ідентифікується лише гематит (Fe_2O_3).

Дані РФА добре узгоджуються з результатами адсорбційно-структурних досліджень і свідчать про те, що фазові перетворення є одним з основних факторів, що визначають шляхи гідротермального модифікування феросилікагелів. На підставі проведених в роботі досліджень отримані результати можна пояснити як процесами масопереносу, що відбуваються в колоїдних системах при ГТО, так і процесами фазових перетворень.

При осадженні силікагелю з негативно зарядженими колоїдними частками і гідроксиду заліза з позитивним зарядом відбувається взаємна коагуляція часток силікагелю і гідроксиду заліза, які осаджуються одночасно, при цьому кремнезем проявляє захисну дію, адсорбуючись на поверхні часток гідроксиду заліза, що екранує їх одна від одної і перешкоджає росту кристалів [3]. Це пояснює утворення більш розвинутої пористої структури феросилікагелів порівняно з чистим ферогелем і їх більшу стійкість при ГТО і ТО (табл.1,2).

Ефект зростання величини питомої поверхні феросилікагелів при низьких температурах ГТО може бути пояснений тим, що в умовах ГТО пари води знижують вільну поверхневу енергію твердого тіла, в результаті чого зростає швидкість утворення зародків нової фази, що обумовлює збільшення дисперсності системи. Подальше зниження величини питомої поверхні зі збільшенням температури ГТО пов'язано з ростом кристалів і процесами розчинення-осадження, які при ГТО багатократно прискорюються порівняно з ТО завдяки не тільки високим температурам, але й наявності вологи. Результатом цих процесів є зростання первинних часток і, відповідно, зниження величини питомої поверхні.

5. Висновки

Досліджено закономірності гідротермального та термічного модифікування спільноосаджених феросилікагелів з різним співвідношенням Fe_2O_3 : SiO_2 при різних умовах.

Показано, що ГТО дає більш широкі можливості регулювання їх пористої структури, ніж ТО. При комбінації методів ТО і ГТО на модифікування пористої структури феросилікагелів домінуючим фактором, що визначає характер змін, є ГТО, крім того гідротермально модифіковані феросилікагелі мають більшу термостабільність, що є важливим при їх використанні в високотемпературних каталітичних процесах.

Досліджено фазові перетворення в гідротермальних умовах, що сприяє кращому розумінню механізмів взаємного впливу компонентів в бінарних спільноосаджених системах.

Показано, що варіюванням умов гідротермального модифікування можна отримувати феросилікагелі з різним вмістом заліза з заданими значеннями величини питомої поверхні ($20-600 \text{ м}^2/\text{г}$), сорбційного об'єму пор ($0,1-1 \text{ см}^3/\text{г}$), сумарного об'єму пор ($0,3-2,5 \text{ см}^3/\text{г}$), діаметра пор ($30-5000 \text{ Å}$), при чому отримувати сорбенти з різним фазовим складом, що в значному ступеню визначає можливості їх застосування.

Список літератури: 1. Нефедов, Б. К. Катализаторы процессов углубленной переработки нефти [Текст] / Б. К. Нефедов, Е. Д. Радченко, Р. Р. Алиев. – М. : Химия, 1992. – 266 с. 2. Неймарк, И. Е. Синтетические минеральные адсорбенты и носители катализаторов [Текст] / И. Е. Неймарк. – Киев : Наукова думка, 1982. – 104 с. 3. Ермоленко, Н. Ф. Регулирование пористой структуры окисных адсорбентов и катализаторов [Текст] / Н. Ф. Ермоленко, М. Д. Эфрос. – Минск : Наука и техника, 1981. – 288 с. 4. Сидорчук, В. В. Влияние гидротермальной обработки на структуру бинарных адсорбентов $\text{ZrO}_2\cdot\text{SiO}_2$, $\text{SnO}_2\cdot\text{SiO}_2$ [Текст] / В. В. Сидорчук, В. А. Кагановский, В. М. Чертов // Докл. АН УССР. Сер. Б. – 1984. – С. 58 – 60. 5. Комаров, В. С. Физико-химические основы регулирования пористой структуры адсорбентов и катализаторов [Текст] / В. С. Комаров, И. Б. Дубницкая. – Минск : Наука и техника, 1981. – 336 с. 6. Чертов, В. М. Некоторые особенности гидротермального старения силикагеля [Текст] / В. М. Чертов, В. В. Цырина // Колл. журн. – 1985. – т. 47, в. 5. – С. 922 – 926. 7. Кельцев, Н. В. Основы адсорбционной техники [Текст] / Н. В. Кельцев. – М. Кельцев, Н. В. : Химия, 1984. – 592 с. 8. Грег, С., Синг, К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость [Текст] : пер. с англ. – М. : Мир, 1970. – 407 с.

Поступила в редколлегию 07.06.2012

УДК 622.646.023.622.795:536.24

В.О. СКАЧКОВ, канд. техн. наук, доц., ЗДІА, Запоріжжя,
В.І. ІВАНОВ, ст. викл., ЗДІА, Запоріжжя,
С.А. ВОДЕННИКОВ, докт. техн. наук, проф., зав. каф., ЗДІА, Запоріжжя,
Ю.В. МОСЕЙКО, канд. пед. наук, доц., ЗДІА, Запоріжжя

ПРО КІНЕТИЧНІ ПАРАМЕТРИ ОСАДЖЕННЯ БОРУ НА ПОВЕРХНІ ВУГЛЕЦЕВИХ ВОЛОКОН

Викладено підхід до вивчення кінетичних параметрів осадження твердого осаду у вигляді кристалічного бору на поверхні вуглецевих волокон у проточному термохімічному реакторі ізобарного типу.

Ключові слова: кристалічний бор, вуглецеве волокно, проточний реактор, кінетичні параметри

Изложен подход к изучению кинетических параметров осаждения твердого осадка в виде кристаллического бора на поверхности углеродных волокон в проточном термохимическом реакторе изобарного типа.

Ключевые слова: кристаллический бор, углеродное волокно, проточный реактор, кинетические параметры

It is carried out approach to study of kinetic parameters for deposition of hard sediment as the crystalline boron on the surface of carbon fibres in the flowing thermochemical reactor of isobar type.

Keywords: crystalline boron, carbon fibre, flowing reactor, kinetic parameters

Вступ

Важливим напрямом сучасного матеріалознавства є створення термостійких міцних композитів з низькою питомою вагою, до яких відносять боровуглецеві композити на основі вуглецевих волокон і борної матриці, що мають питому вагу в межах $1,6 \dots 1,8 \text{ г/см}^3$ [1].

Для створення безпористої борної матриці застосовують метод осадження з рухомою зоною розкладання диборана за товщиною вуглецевого каркаса, що засновано на створенні заданого градієнта температури за об'ємом каркаса [2].

Під час практичної реалізації процесу одержання зазначених композитів необхідним є знаходження раціональних значень технологічних параметрів: температури, концентрації диборану та швидкості його подавання до реактора.

Постановка завдання

Завданням досліджень є розробка методики обчислення кінетичних параметрів хімічної реакції розкладання диборану та дифузії бору під час його осадження на поверхні вуглецевих волокон у проточному реакторі.

Розробка методики обчислення

Реактор для осадження бору подають у вигляді двох коаксіально розташованих кварцових циліндрів. На бічній поверхні циліндра меншого діаметра рівномірно укладено вуглецеві волокна, які піддають нагріванню за допомогою ніхромового нагрівача, розташованого усередині циліндра. На вхід реактора подають гідрид бору, на виході з нього одержують диборан, що не прореагував, а також продукти його повного та неповного розкладання. Зазначений реактор є ізобарним, що дозволяє спростити моделювання процесу осадження бору [3].

У реакторі реалізують конвективно-дифузійне перенесення маси реагуючого газу. Рівняння перенесення речовини за умов хімічного перетворення для поточного середовища подають у вигляді:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial \tau} + \text{div}(\vec{U} \cdot \rho_i - D_{iN} \cdot \nabla \rho_i) = k_i \cdot \sum_{i=1}^N \rho_i^{n_i}, \quad (1)$$

де ρ_i – парціальна щільність i -го реагуючого компонента газового середовища; $\vec{U}$ – швидкість потоку газового середовища; D_{iN} – коефіцієнт дифузії i -го компонента у газовому середовищі з N компонентів; τ – тривалість процесу; k_i n_i – константа швидкості та порядок хімічної реакції за i -тим компонентом відповідно.

Для зручності розглядання рівняння (1) його подають через молярні концентрації та одержують:

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} + \text{div}(\vec{U} \cdot C_i - D_{iN} \cdot \nabla C_i) = k_i \cdot \sum_{i=1}^N C_i^{n_i}, \quad (2)$$

де C_i – концентрація i -го компонента в обсязі реакційного середовища.

У разі, коли відбувається хімічна взаємодія речовин і з'являється необхідність дослідження конвективно-дифузійного перенесення кожного

компонента, складають систему, що містить N рівнянь типу (5), записаних для N компонентів.

Вважаючи, що об'ємні реакції є відсутніми, рівняння (5) можна записати як

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} + \text{div}(\overline{U} \cdot C_i - D_{iN} \cdot \nabla C_i) = 0. \quad (3)$$

Інтегрування рівняння (5) припускає відомі початкові та межові умови процесу.

Межові умови визначають умови хімічної взаємодії на межі сполучення реакційних газів і нагрітих поверхонь, її газопроникність та активність.

Щільність потоку компонентів газового середовища j_k^i на реакційну поверхню визначають за допомогою співвідношення:

$$j_k^i = D_{iN} \cdot \frac{\partial C_i}{\partial \Pi} \Big|_G = W_{\text{г.х.м.р}}^i, \quad (3)$$

де $W_{\text{г.х.м.р}}^i$ – швидкість гетерогенної реакції; $W_{\text{г.х.м.р}}^i = k_i^{\text{г}} \cdot C_0^i \cdot S_{\text{num}}$, $k_i^{\text{г}}$ – константа швидкості гетерогенної реакції; C_0^i – концентрація i -того компонента газового середовища на реакційній поверхні; S_{num} – питома реакційна поверхня; G, Π – межа та нормаль реакційної поверхні.

Очевидно, що концентрація газового реагенту біля реакційної поверхні змінюватиметься доти, доки швидкість дифузії з обсягу реактора та швидкість дифузії на реакційну поверхню відрізнятимуться одна від одної. Якщо прийняти закон змінювання концентрації від ядра реактора до реакційної поверхні таким, що є лінійним, то градієнт концентрації визначатиметься рівнянням [4]:

$$\frac{dC}{d\Pi} = \frac{C_i - C_0}{\delta}, \quad (4)$$

де δ – товщина дифузійного шару.

Підставляючи співвідношення для $W_{\text{г.х.м.р}}^i$ та (4) до рівняння (3), одержують залежність між концентрацією реакційного газу в потоці та його концентрацією на питомій реакційній поверхні реактора:

$$D_{iN} \cdot \frac{(C_i - C_0^i)}{\delta} = S_{\text{num}} \cdot k_i^{\text{г}} \cdot C_0^i. \quad (5)$$

Звідки

$$C_0^i = \frac{\beta_i \cdot C_i}{S_{\text{num}} \cdot k_i^{\text{г}} + \beta_i}, \quad (6)$$

де β_i – константа швидкості дифузії ($\beta_i = D_{iN} / \delta$).

З метою подальшого спрощення рівняння (6) вводять припущення:

- розглядають круговий циліндровий реактор, для якого всі функції, що описують структуру газових потоків, не залежать від окружної координати;
- швидкість газового потоку спрямована уздовж осі реактора, а швидкість дифузії реакційних газів уздовж зазначеної осі є досить малою;
- розглядають стаціонарний, сталий та ізотермічний режим роботи реактора.

Реакційною поверхнею у реакторі слугує площа поверхні вуглецевого волокна та трубчастого каркаса, на якому закріплено волокно. Враховуючи, що

вуглецеве волокно, яке укладено за напрямом радіуса до каркаса, має незначну товщину а також достатньо значні зазори між окремими волокнами, то дифузійними процесами в обсязі волокна з високою мірою достовірності можна нехтувати.

Питома поверхня вуглецевого волокна на одиницю довжини каркаса може бути записана як

$$S_{num}^B = \frac{2m}{r \cdot \rho \cdot L_g}, \quad (7)$$

де m – маса вуглецевого волокна, укладеного за довжиною каркаса; r , ρ – радіус і щільність вуглецевого волокна відповідно; L_B – довжина укладання волокна на каркасі.

Питому реакційну поверхню у реакторі визначають за допомогою співвідношення

$$S_{num} = \left(2\pi \cdot R + \frac{2m}{r \cdot \rho \cdot L_g} \right), \quad (8)$$

де R – радіус трубчастого каркаса.

З урахуванням прийнятих припущень рівняння перенесення реакційного газу реактором має вигляд:

$$\frac{d(U \cdot C_i)}{dz} + k_i^z \cdot \frac{\beta_i \cdot C_i}{S_{num} \cdot k_i^z + \beta_i} = 0, \quad (9)$$

де U – швидкість потоку на осі реактора; z – координатна вісь, спрямована за віссю реактора.

На реакційній поверхні реалізують процес осадження твердого осаду у вигляді полікристалічного бору за реакцією:



Процес розкладання диборана (10) відбувається в інтервалі температур 500...700 °С з появою іншого газоподібного продукту – водню, при цьому концентрація диборана щодо довжини реактора зменшується через його розкладання та розбавлення воднем.

Вводячи ступінь розкладання диборана α , з урахуванням реакції (10) можна записати

$$C^{H_2} = 3\alpha \cdot C_{ex}^{B_2H_6}; \quad (11)$$

$$C^{B_2H_6} = C_{ex}^{B_2H_6} \cdot (1 - 4\alpha); \quad (12)$$

$$U = U_{ex} \cdot (1 + 2\alpha), \quad (13)$$

де $C_{ex}^{B_2H_6}$ – концентрація диборана на вході до реактора; U_{ex} – швидкість газового потоку на вході до реактора.

Враховуючи співвідношення (11)-(13), рівняння (9) можна подати у вигляді

$$\left(\frac{2 + 16\alpha}{1 - 4\alpha} \right) \cdot \frac{d\alpha}{dz} + \frac{\Omega}{\theta + \beta} = 0, \quad (14)$$

$$\text{де } \Omega = \frac{k_{B_2H_6}^z \cdot \beta}{U_{ex}}; \quad \theta = S_{num} \cdot k_{B_2H_6}^z.$$

Для рівняння (14) межеву умову задають як

$$\alpha|_{z=0} = 0. \quad (15)$$

Розв'язання рівняння (14) за умови (15) можна подати як

$$4\alpha - 1,5 \ln(1 - 4\alpha) = \frac{\Omega \cdot z}{\theta + \beta}. \quad (16)$$

Ступінь розкладання диборана за вказаних умов є величиною достатньо малою. Тоді, розкладаючи натурального логарифма у ряд Макларена та нехтуючи членами другого порядку мализни, одержують

$$\alpha = \frac{\Omega \cdot z}{10 \cdot (\theta + \beta)}. \quad (17)$$

З рівняння (13) можна записати

$$\alpha|_{z=L} = 0,5 \left(\frac{U_{вих}}{U_{ex}} - 1 \right), \quad (18)$$

де $U_{вих}$ – швидкість реакційних газів на виході з реактора.

Порівнюючи співвідношення (18), подане для $z = L$, і співвідношення (17), після нескладних перетворень можна одержати

$$k_{B_2H_6}^2 = \frac{5D_U \cdot \beta}{(\beta \cdot \alpha - 5D_U \cdot S_{num})}, \quad (19)$$

де $D_U = U_{вих} - U_{ex}$.

Рівняння (24) задає значення константи швидкості розкладання диборану на поверхні вуглецевих волокон, що закріплено на трубчастому каркасі.

Виміряне значення швидкості осадження бору на поверхні вуглецевих волокон можна визначити як

$$W_l = \frac{\Delta m \cdot (z + \Delta z)}{\rho_s \cdot S_{num} \cdot \Delta z \cdot \tau}, \quad (20)$$

де W_l – лінійна швидкість розкладання бору; Δm – маса осадженого бору на довжині Δz у точці z ; ρ_s – питома вага бору.

Розрахункове значення швидкості осадження бору можна обчислити з використанням співвідношення

$$W_l = \frac{k_{B_2H_6}^2 \cdot \beta \cdot C_{ex}^{B_2H_6} \cdot [1 - \alpha(z)] \cdot S_{num}}{S_n \cdot k_{B_2H_6}^2 + \beta}. \quad (21)$$

Зіставлення правих частин співвідношень (20) і (21) дозволяє записати

$$\beta = \frac{\Delta m}{\left[C_{ex}^{B_2H_6} \cdot (1 - \alpha) \cdot \rho_B \cdot S_{num} \cdot \Delta z \cdot \tau \right] - \frac{\Delta m}{k_{B_2H_6} \cdot S_{num}}}. \quad (22)$$

Співвідношення (22) дозволяє обчислити значення швидкості дифузії із обсягу реактора на реакційну поверхню. Враховуючи залежність β від коефіцієнта дифузії, можна визначити товщину дифузійного шару.

Висновки

На основі вирішення задачі перенесення газового середовища в круговому проточному реакторі ізобарного типу з розкладанням диборана на нагрітій

поверхні вуглецевих волокон побудовано методику визначення кінетичних параметрів процесу розкладання та дифузії бору з обсягу реактора на поверхню вуглецевих волокон.

Список літератури: 1. Скачков, В. А. Бороуглеродные композиционные материалы / В. А. Скачков, В. И. Иванов, А. Л. Иващенко // Стратегия качества в промышленности и образовании : материалы межд. научн.-практ. конф. – Днепропетровск-Варна : Пороги-ТУ Варна, 2006. – Т. 1. – С. 184. 2. Гурин, В. А. Исследование газофазного уплотнения пироугле-родом пористых сред методом радиально движущейся зоны пиролиза / В. А. Гурин, И. В. Гурин, С. Г. Фурсов // Вопросы атомной науки и техники. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 1999. – Вып. 4 (76). – С. 32-45. 3. Денисов, Е. Т. Кинетика гомогенных химических реакций / Е. Т. Денисов. – М. : Высшая школа, 1988. – 390 с. – Библиогр. : с. 374-382. – ISBN 5-06-001337-5. 4. Франк-Каменецкий, Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д. А. Франк-Каменецкий. – М. : Наука, 1967. – 491 с. – Библиогр. : с. 485-489.

Поступила в редколлегию 03.06.2012

УДК 541.127: 542.943

А.Г. ГАЛСТЯН, канд. техн. наук, доц., Института химических технологий Восточноукраинского национального университета им. В. Даля, Рубежное

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ ИЗОМЕРНЫХ АЦЕТИЛАМИНОТОЛУОЛОВ С ОЗОНОМ В ЖИДКОЙ ФАЗЕ В ПРИСУТСТВИИ МАРГАНЕЦБРОМИДНОГО КАТАЛИЗАТОРА

Вивчено кінетику реакції озону з ацетиламінотолуолами в середовищі оцтового ангідриду в присутності сульфатної кислоти і змішаного манганбромідного каталізатора. Показано, що основними продуктами окиснення в цих умовах є відповідні ацетиламінобензилідендіацетати (56-67%), в продуктах реакції також знайдено ацетиламінобензилацетати (18-20%). Розглянуто механізм каталізу, що пояснює отримані експериментальні дані

Ключові слова: Окиснення, ацетиламінотолуол, озон, каталізатор.

Изучена кинетика реакции озона с ацетиламинотолуолами в среде уксусного ангидрида в присутствии серной кислоты и смешанного марганецбромидного катализатора. Показано, что основными продуктами окисления в этих условиях являются соответствующие ацетиламинобензилідендіацетати (56-67%), в продуктах реакции также обнаружены ацетиламинобензилацетаты (18-20%). Рассмотрен механизм катализа, объясняющий полученные экспериментальные данные.

Ключевые слова: Окисление, ацетиламинотолуол, озон, катализатор.

The kinetics of liquid-phase catalytic oxidation of acetylaminotoluene with of ozone in the presence of sulfuric acid and manganese acetate (II) and potassium bromid . It is shown that the main products of oxidation in these conditions are acetylaminobenzilidendiatsat (56-67%) and acetylaminobenzilatsetat (18-20%). The mechanism of redox catalysis.

Keywords: Oxidation, acetylaminotoluene, ozone, catalyst.

1. Введение

Ранее [1,2] было показано, что селективное окисление аминотолуолов озоном без разрушения ароматического кольца протекает в растворе уксусного ангидрида в присутствии марганец (II) ацетата и катализатора ацилирования – серной кислоты. Основными продуктами реакции в условиях катализа являются

аминобензиловые спирты в виде соответствующих ацетиламинобензилацетатов (ААБА), выход которых достигает 52-65 %. Получить в этих условиях в качестве основных продуктов аминобензальдегиды в виде ацетиламинобензилидендиацетатов (ААБДА) не удастся, выход их не превышает 19 %. Для решения этой задачи в данной работе исследовано влияние добавок бромида калия на кинетику и состав продуктов каталитического окисления ацетиламинотолуолов (ААТ) озоном, поскольку известна способность бромидов щелочных металлов в процессе каталитического окисления алкилароматических углеводородов озоном повышать глубину, селективность и скорость окисления [3].

2. Экспериментальная часть

Окисление проводили в стеклянной колонке с пористой перегородкой при температуре 5-20⁰С. В колонку загружали 10 мл растворителя, расчетное количество ингредиентов и подавали озоновоздушную смесь со скоростью 30 л·ч⁻¹ с концентрацией озона $4,8 \cdot 10^{-4}$ моль·л⁻¹. Концентрацию озона в газовой фазе анализировали спектрофотометрическим методом по поглощению в области 254-290 нм, концентрацию Mn(III) в растворе - йодометрически. Идентификацию и количественное определение продуктов реакции осуществляли методом ГЖХ на хроматографе с пламенно-ионизационным детектором на колонке 3 м, заполненной носителем Инертон AW-DMCS, обработанным 10% раствором щелочи и нанесенной на него неподвижной фазой "Apiezon L" в количестве 10% от массы носителя при температуре испарителя 250⁰С, термостата – по программе 90-200⁰С в течение 15 мин; скорость газа-носителя (азота) – 1,8, водорода – 1,8 и воздуха – 18 л·ч⁻¹. В качестве внутреннего стандарта использовали нитробензол.

3. Результаты и их обсуждение

При атмосферном давлении и температуре 20⁰С (рис.1) озонирование 4-ААТ в среде уксусного ангидрида в присутствии каталитических добавок серной кислоты, ацетата марганца и бромида калия протекает преимущественно с образованием 4-ААБДА (67%). В реакционной массе также обнаружены 4-ААБА (20%) и 4-ацетиламинобензилбромид (ААББ) (2%), при исчерпывающем окислении 4-ААТ в системе накапливается 4-ацетиламинобензойная кислота (4-ААБК). Аналогичные данные получены при окислении 3-ААТ, в случае озонирования 2-ААТ селективность окисления по метильной группе несколько ниже (выводы), что, вероятно, связано со стерическим

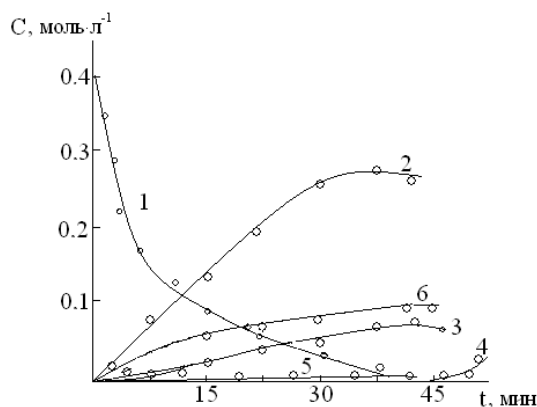


Рис. 1. Кинетика окисления 4-ААТ озоном в уксусном ангидриде в присутствии марганецбромидного катализатора при 20⁰С. $[4\text{-ААТ}]_0 = 0,4$; $[\text{Mn}(\text{OAc})_2]_0 = 0,1$; $[\text{KBr}]_0 = 0,1$; $[\text{H}_2\text{SO}_4]_0 = 1,2$; $[\text{O}_3]_0 = 4,8 \cdot 10^{-4}$ моль·л⁻¹. 1-(4-ААТ); 2-(4-ААБДА); 3-(4-ААБА); 4-(4-ААБК); 5-(4-ААББ); 6-[$\text{Mn}^{2+}\text{Br}^\bullet$]. C- концентрация, моль·л⁻¹; t – время реакции, мин.

эффектом заместителей.

На селективность и соотношение продуктов окисления существенно влияет количественный состав марганецбромидного катализатора (табл.1). Максимальные выход ААБДА и селективность окисления ААТ достигаются при мольном соотношении $[\text{Mn}(\text{OAc})_2]_0 : [\text{KBr}]_0 = 1:1$ (исходные концентрации ацетата марганца и бромида калия $0,1 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$), дальнейшее увеличение концентрации KBr не приводит к существенным изменениям (табл.1). Отмечена линейная зависимость между $\lg r - \lg [\text{Mn}^{2+}]$ и $\lg [\text{Br}^-]$, порядок по катализатору близок к (1) (рис.2). Более высокая скорость и селективность окисления по метильной группе в присутствии бромида калия объясняется тем, что скорость инициирования селективного окисления ААТ в реакции с $\text{Mn}^{2+} \text{Br}^*$ (реакция 5) почти в три раза превышает скорость инициирования ацетатом марганца (реакция 4) (табл. 2). При этом, достижение высокой селективности окисления наблюдается при снижении оптимальной концентрации марганца в марганецбромидном катализаторе на 40% (табл. 1).

Таблица 1- Окисление 2-ААТ в присутствии марганецбромидного катализатора различного состава (усл. см. выводы)

$[\text{Mn}(\text{OAc})_2]_0$, моль·л ⁻¹	$[\text{KBr}]_0$, моль·л ⁻¹	Выход, %	
		2-ААБДА	2-ААБА
0.14	—	17.0	52.0
0.10	0.04	22.0	46.2
0.10	0.08	41.3	28.0
0.10	0.10	56.0	17.0
0.10	0.12	54.0	17.1
0.10	0.14	52.1	16.9

Скорость и селективность окисления ААТ до ААБДА зависят от температуры: с ростом температуры суммарная скорость окисления увеличивается, а селективность окисления по метильной группе с образованием ААБА и ААБДА снижается (табл. 3). На первый взгляд, найденная зависимость противоречит экспериментальным данным, в соответствии с которыми при общей тенденции к росту скорость селективного окисления (реакция 5) растет быстрее, чем скорость озонлиза (реакция 19) ($E_5 = 38.4$; $E_{19} = 24.3 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$, табл. 2). Однако кинетические исследования взаимодействия озона с продуктами реакции показали, что полученные закономерности действительно

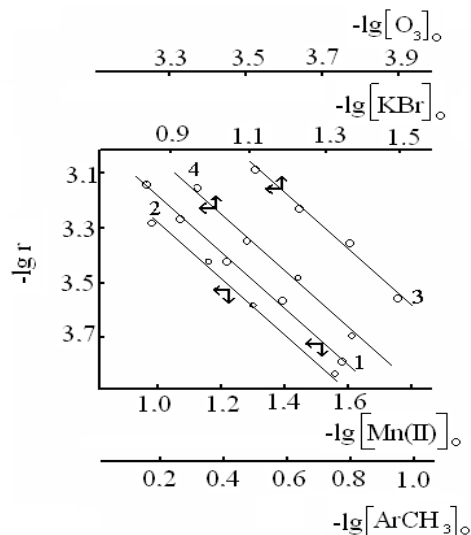


Рис.2. Зависимость скорости окисления 3-ААТ от концентрации ацетата марганца – 1; субстрата – 2; бромида калия – 3; озона – 4 при 20°C. r – скорость реакции, моль·(л·с)⁻¹

могут иметь место, поскольку зависимость скорости окисления от температуры растёт в ряду: $r_{17} > r_{16} > r_5$ ($E_{17} = 51.5$; $E_{16} = 44.5$; $E_5 = 38.4$ кДж·моль⁻¹, (табл. 2)).

Таблица 2- Кинетические параметры реакций каталитического цикла^а
(усл. см. выводы)

Номер реак- ции	Реакция	K^6 , л·(моль·с) ⁻¹		E , кДж·моль ⁻¹	$r^{20^\circ\text{C}}$, моль·(л·с) ⁻¹
		20°C	40°C		
(3)	$\text{O}_3 + \text{Mn}^{2+}\text{Br}^-$	20.30±2.00	55.00±5,50	26.1±2.2	$8.1 \cdot 10^{-4}$
(19)	4-ААТ+ O_3	0.59±0.05	0.82±0,05	24.3±2.0	$0.9 \cdot 10^{-4}$
(4)	4-ААТ + Mn^{3+}	$10.00 \cdot 10^{-3}$	$19.52 \cdot 10^{-3}$	26.1±2.2	$5.6 \cdot 10^{-4}$
(5)	4-ААТ + $\text{Mn}^{2+}\text{Br}^\bullet$	$3.10 \cdot 10^{-2}$	$12.10 \cdot 10^{-2}$	38.4±3.6	$12.4 \cdot 10^{-4}$
(6)	$\text{ArCH}_2^\bullet + \text{O}_2$	$4.7 \cdot 10^9$			$1.3 \cdot 10^2$
(7)	$\text{ArCH}_2\text{O}_2^\bullet + \text{ArCH}_3$	2.3			$3.2 \cdot 10^{-6}$
(8)	$\text{ArCH}_2\text{O}_2^\bullet +$ $+ \text{Mn}^{2+}\text{Br}^-$	10^2			$3.5 \cdot 10^{-5}$
(9)	$\text{ArCH}_2\text{O}_2^\bullet + \text{O}_3$	10^2			$1.4 \cdot 10^{-7}$
(12)	$2\text{ArCH}_2\text{O}_2^\bullet$	10^8			$12.4 \cdot 10^{-4}$
(13)	$\text{ArCH}_2\text{O}^\bullet + \text{Mn}^{2+}\text{Br}^-$	10^3			$3.5 \cdot 10^{-4}$
(15)	$2\text{ArCH}_2\text{O}_2^\bullet$	10^8			$12.4 \cdot 10^{-4}$
(16)	4-ААБА + $\text{Mn}^{2+}\text{Br}^\bullet$	$9.21 \cdot 10^{-3}$	$31.34 \cdot 10^{-3}$	44.5±4.0	$3.7 \cdot 10^{-4}$
(17)	4-ААБДА + $\text{Mn}^{2+}\text{Br}^\bullet$	$4.92 \cdot 10^{-3}$	$13.28 \cdot 10^{-3}$	51.5±5.0	$2.0 \cdot 10^{-4}$

Примечание: а – скорость реакции, определенная по данным рис. 1 – $9.5 \cdot 10^{-4}$ моль·(л·с)⁻¹.

Примечание: б – K_{20} ; K_3 ; K_4 ; K_5 ; K_{16} ; K_{17} – рассчитаны по данным авторов; значение K_6 взято для метильного радикала [4]; K_9 – для реакции $\text{CH}_3\text{O}_2^\bullet + \text{O}_3$ [5]; K_7 ; K_8 ; K_{12} и K_{15} взяты для реакции толуола с кобальтом [6] с корректировкой на окислительно-восстановительный потенциал Mn^{2+} [7]; $K_{13} = 10K_8$ с учетом более высокой реакционной способности алкоксильного радикала [7].

Концентрацию ацетиламинопероксидного радикала в расчетах оценивали исходя из условий стационарных концентраций реагирующих частиц.

$$K_5 [\text{ArCH}_3][\text{Mn}^{2+}\text{Br}^\bullet] = K_{12}[\text{ArCH}_2\text{O}_2^\bullet]^2$$

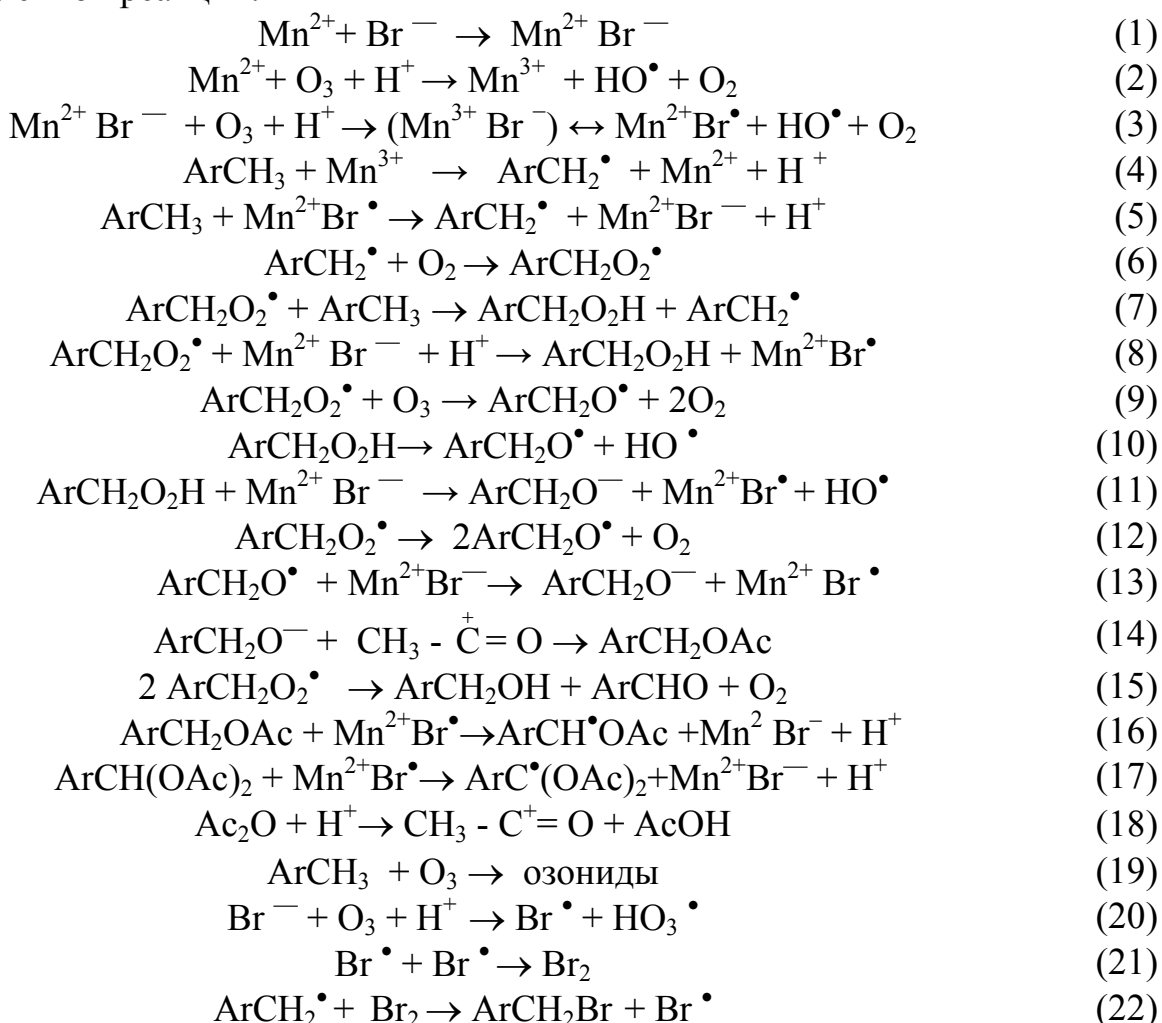
откуда

$$[\text{ArCH}_2\text{O}_2^\bullet] = (K_5 [\text{ArCH}_3][\text{Mn}^{2+}\text{Br}^\bullet])/K_{12}$$

Таблица 3- Влияние температуры на селективность и скорость реакции окисления соединения 3-ААТ (усл. см. выводы)

T , °C	$r \cdot 10^4$, моль·(л·с) ⁻¹	Продукты реакции, моль·л ⁻¹		Суммарная селективность, %
		3-ААБДА	3-ААБА	
10	7.5	0.272	0.068	86.5
20	8.6	0.274	0.070	87.9
25	10.1	0.256	0.067	80.8
30	13.6	0.203	0.060	65.8
35	17.2	0.120	0.046	41.5

В соответствии с полученными кинетическими данными, а также общими представлениями о механизме реакций окисления, катализируемых металлбромидными катализаторами [3,8–10], рассмотрим результаты кинетических исследований в рамках классической схемы цепной неразветвленной реакции:



В отсутствие ионов брома активной формой катализатора является частица Mn^{3+} (реакция 2), которая вовлекает в окисление ААТ по метильной группе с образованием ацетиламинобензильного радикала (реакция 4). Введение в систему ионов брома приводит к образованию более активного марганецбромидного катализатора (реакции 1 и 3). При соотношении $[\text{Mn(II)}]:[\text{Br}^-] = 1:1$ ААТ вовлекается в окисление по реакции (5). В условиях, когда в озоновоздушной смеси $[\text{O}_2] \gg [\text{O}_3] \approx 22$, образующиеся ацетиламинобензильные радикалы трансформируются в ацетиламино-пероксидные радикалы (реакция 6), дальнейшим превращением которых в рамках рассматриваемой схемы возможно при условии: $r_i = r_t \ll r_p$, т.е. при длине цепи $\bar{\nu} = r_{\text{опыт}} / r_i \gg 1$. Однако оценочные расчеты показывают, что в условиях опытов эта зависимость не соблюдается: $r_i(r_5) = r_t(r_{12}) \gg r_p(r_7; r_8; r_9)$ (табл.2), а длина цепи $\bar{\nu} = r_p / r_i = 3.5 \cdot 10^{-4} / 12.4 \cdot 10^{-4} = 0.28$. Скорее всего, в присутствии марганецбромидного катализатора окисление ААТ развивается по ионно-радикальному нецепному механизму, в соответствии с которым продукты окисления, в основном, образуются в результате гибели ацетиламинопероксидных радикалов.

Гибель ацетиламинопероксидных радикалов может проходить преимущественно по реакции (12), поскольку реакция (15) предполагает параллельное образование ААБА и ААБДА, что противоречит экспериментальным данным. По-видимому, образующиеся в клетке растворителя алкоксильные радикалы в условиях эксперимента выходят в объем (реакция 12) [7], где с высокой скоростью реагируют с восстановленной формой катализатора (реакция 13) с образованием продуктов реакции ($K_{13}/K_8 \approx 10$ [7]). В целом процесс, очевидно, развивается по схеме реакций (6–12–13–14), но на стадии образования ААБА не останавливается, а продолжается вплоть до образования ААБДА и ААБК [(16,18) и далее – аналогично схеме реакций (6–12–13–14)]. Образование ААББ, вероятно, обусловлено протеканием реакций (20–22).

4. Выводы

Из выше изложенного следует, что при окислении ААТ озоном в присутствии марганецбромидного катализатора высокая селективность окисления по метильной группе достигается при соизмеримых концентрациях катализатора и субстрата. Ниже приведено окисление ААТ озоновоздушной смесью в уксусном ангидриде в присутствии марганецбромидного катализатора при 20°C: $[O_3]_0 = 4.2 \cdot 10^{-4}$; $[I]_0 = 0.4$; $[Mn(OAc)_2]_0 = 0.1$; $[KBr]_0 = 0.1$; $[H_2SO_4]_0 = 1.2 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$; $V_p = 0.01 \text{ л}$.

Таблица 4 - Выход продуктов окисления

Соединение	Выход продуктов окисления, %		
	ААБДА	ААБА	ААБК
2-ААТ	56.0	18.0	следы
3-ААТ	65.7	18.6	1.6
4-ААТ	67.0	20.0	2.0

Окисление протекает по ионно-радикальному нецепному механизму, включающим следующую последовательность реакций: (5) – (6) – (12) – (13) – (14) – (17). Материальный баланс процесса с учетом этих реакций приводит к итоговому уравнению:



которое соответствует наблюдаемым в эксперименте первым порядкам по исходным компонентам (рис.2):

$$r = K_{эф} [AcOArCH_3]_0 [Mn^{2+} Br^-]_0 [O_3]_0 \quad (24)$$

Список литературы: 1. Галстян А.Г. Окиснення метилбензолів озоном в оцтовому ангідриді [Текст] / А.Г. Галстян, І.А. Зьома, А.С. Головченко // Матеріали І Української конференції «Реакції окиснення. Наука і технологія». – Рубіжне: ІХТ СНУ ім. В.Даля, 2010. – С.93-95. 2. Галстян А.Г. 4-Амінобензальдегід. Одержання каталітичним окисненням 4-амінотолуолу озоном [Текст] / А.Г. Галстян, І.А. Зьома, Г.А. Галстян, Т.М. Галстян // Хімічна промисловість України. – 2011. – Т.103, №2. – С. 30-33. 3. Захаров И.В. Кобальтбромидный катализ окисления органических соединений [Текст] / И.В.Захаров, Ю.В.Галетий, В.А. Адамян // Кинетика и катализ. – 1988. – Т.29, № 5. – С.1072–1077. 4. Денисов Е.Т. Механизм жидкофазного окисления кислородсодержащих соединений [Текст] / Е.Т. Денисов, Н.И. Мицкевич, В.Е. Агабеков. – Минск: Наука и техника, 1975. – 334с. 5. Галстян Г. А. Озон и его реакции с ароматическими соединениями в жидкой фазе [Текст] / Г. А. Галстян, Н. Ф.Тюпало, С. Д. Разумовский. – Луганськ : ВУНУ, 2004. – 272 с. 6. Захаров И.В. Механизм и параметры окисления алкилароматических углеводородов в присутствии ионов кобальта и брома [Текст] /

И.В.Захаров, Ю.В. Галетий // Нефтехимия. – 1978. – Т.18, № 4. – С.615–621. 7. Денисов Е.Т. Константы скорости гомолитических жидкофазных реакций [Текст] / Е.Т. Денисов - М.: Наука, 1971. - 711с. 8. Бухаркина Т.В. Кинетика окисления толуола в уксусной кислоте солями Со(III) и Мп(III) в присутствии бромида калия [Текст] / Т.В. Бухаркина, Н.Д. Гавриленко, Н.Г. Дигуров, Н.А. Князева // Кинетика и катализ. – 1978. – Т.19, №2. – С.506-510. 9. Белецкая И. П. Окисление алкилароматических углеводородов солями переходных металлов [Текст] / И. П. Белецкая, Д. И. Махоньков // Успехи химии. – 1981. – Т. 50, № 6. – С. 1007–1045. 10. Эмануэль Н. М. Проблемы селективного жидкофазного окисления [Текст] / Н.М. Эмануэль // Нефтехимия. – 1978. – Т. 18, № 4. – С. 485–518.

Поступила в редколлегию 11.06.2012

УДК 547.497.6:547.584

В.В. ШТАМБУРГ, канд. хим. наук, ст. преп., НТУ «ХПИ», Харьков,
В.Г. ШТАМБУРГ, док. хим. наук, проф., НТУ «ХПИ», Харьков, ГВУЗ
 «УГХТУ», Днепропетровск,
А.Е. ШИШКО, студ., НТУ «ХПИ», Харьков

НОВЫЙ КАТАЛИЗАТОР МЕЖФАЗНОГО ПЕРЕНОСА ДЛЯ СИНТЕЗА ТРИАЛКИЛОРТОФОРМИАТОВ

Дибромід 1,8-біс(Н-аміно-Н,Н-диметиламмоній)-3,6-діоксаоктану виявився ефективним каталізатором міжфазного переносу в синтезі триалкілортоформатів з хлороформу, спирту та NaOH у гетерофазній системі.

Дибромид 1,8-бис(Н-амино-Н,Н-диметиламмоний)-3,6-диоксаоктана проявил себя в качестве эффективного катализатора фазового переноса в реакциях получения триалкілортоформатов из хлороформа, спирта и NaOH в гетерофазной системе.

It was found that the 1,8-bis(N-amino-N,N-dimethylammonium)-3,6-dioxaoctane dibromide was effective interphase transfer catalyst for the syntheses of trialkylorthoformates from chloroform, alcohol and NaOH in heterophase system.

Синтез триалкілортоформатов из хлороформа, спирта и щелочи в гетерофазной системе является одним из самых экономичных и простых способов получения этих труднодоступных соединений [1-3]. Поскольку используемые реагенты находятся в разных фазах, для осуществления между ними взаимодействия необходимо использование катализатора фазового переноса (КФП). В качестве последних могут применяться как стандартные КФП – краун-эфиры и четвертичные аммониевые соли [2,3], так и новые типы КФП поданной природы, α,ω-бис-(диалкиламино)олигооксаалканы [1] и бромиды α,ω-бис-(N,N,N-триалкиламмоний)олигооксаалканов [2,3].

Недавно нами был описан синтез нового поданда данного типа, дибромид 1,8-бис(Н-амино-Н,Н-диметиламмоний)-3,6-диоксаоктана **1** [4], синтезированного

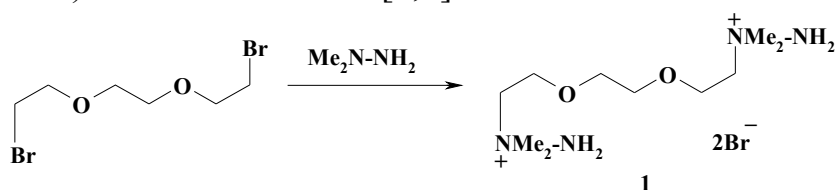


Рис.1. Синтез дибромид 1,8-бис(Н-амино-Н,Н-диметиламмоний)-3,6-диоксаоктана **1**

взаимодействием избытка 1,1-диметилгидразина с 1,8-дибром-3,6-диоксаоктаном (рис.1). Данная статья посвящена изучению возможности применения этого соединения в качестве КФП в гетерофазном синтезе триалкилортоформиатов.

Найдено, что соль **1** катализирует образование триэтилортоформиата, три(*n*-бутил)ортоформиата и триметилортоформиата из хлороформа, соответствующего спирта и NaOH в среде дихлорметана даже при использовании в количестве 0,1 мольн.% / на 1 моль спирта.

Целевые эфиры ортомуравьиной кислоты образуются с приемлемыми выходами (рис. 2), их строение доказано с помощью спектроскопии ЯМР ¹H.

Стандартные КФП – краун-эфиры и

четвертичные аммониевые соли позволяют добиться выходов такого же порядка при использовании их в количестве 0,5 – 2 мольн. % / на 1 моль спирта [1-3], что как минимум в пять раз больше, чем для случая предложенного нами катализатора. Это свидетельствует о том, что дибромид 1,8-бис(N-амино-N,N-диметиламмоний)-3,6-диоксаоктана **1** также является высокоэффективным КФП для данной гетерофазной реакции.

Таким образом установлено, что дибромид 1,8-бис(N-амино-N,N-диметиламмоний)-3,6-диоксаоктана **1** является новым перспективным катализатором фазового переноса.

Экспериментальная часть

Спектр ЯМР ¹H регистрировали на спектрометрах Mercury-400” (400 МГц, Me₄Si в качестве внутреннего стандарта; приведены значения δ, м.д., КССВ (J, Гц.). CHCl₃ и CH₂Cl₂ абсолютировали кипячением и перегонкой над P₂O₅. Этанол и метанол абсолютировали кипячением и перегонкой над Са.

Триэтилортоформиат. К 40 г (1000 ммоль) NaOH добавили при охлаждении 23,00 г (500 ммоль, 29 мл) абс. этанола. Выдержали 1 ч при 9°C, затем при перемешивании прибавили 60 мл CH₂Cl₂, в теч. 15 мин. прикапали раствор 29,96 г (250,75 ммоль, 20 мл) CHCl₃ и 0,20 г (0,50 ммоль) дибромид 1,8-бис(N-амино-N,N-диметиламмоний)-3,6-диоксаоктана **1** [4] в 20 мл CH₂Cl₂. Перемешивали 24 ч реакционную смесь, при этом ее температура сперва поднялась до 30°C, а через 5 ч опустилась до *t*_{комн} 10 °C. Выдержали при этой температуре 72 ч, затем отфильтровали неорганический осадок NaCl – NaOH, промыли его 40 мл CH₂Cl₂. Из объединенного фильтрата отогнали CH₂Cl₂, остаток ректифицировали в вакууме. Получено 12,653 г (51 %) триэтилортоформиата, бесцветная жидкость с характерным запахом, т. кип. 70–72/49 мм рт. ст., *n*_D¹² 1,3958, лит. *n*_D²⁰ 1,3922 [5], идентифицированного с заведомым образцом по спектру ПМР [1]. Спектр ЯМР ¹H (400 МГц, CDCl₃, σ, м.д.): 1,199 т, (9H, NOCH₂Me, ³J = 7,2 Гц), 3,556 к (6H, NOCH₂Me, ³J = 7,2 Гц), 5,069 с (1H, CH).

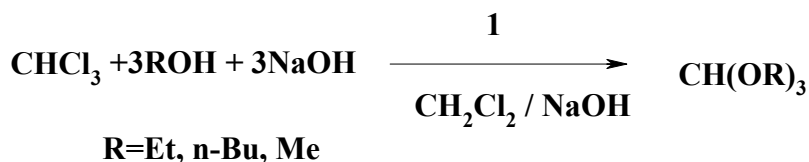


Рис. 2. Синтез триалкилортоформиатов в гетерофазной системе CH₂Cl₂/NaOH при катализе дибромидом 1,8-бис(N-амино-N,N-диметиламмоний)-3,6-диоксаоктана **1**

Три-(*n*-бутил)ортоформиат. К 40 г (1000 ммоль) NaOH добавили при охлаждении 37,06 г (500 ммоль) *n*-бутанола, через 10 мин. добавили при перемешивании раствор 0,20 г (0,50 ммоль) дибромида 1,8-бис(*N*-амино-*N,N*-диметиламмоний)-3,6-диоксаоктана **1** в 60 мл CH₂Cl₂, затем прикапали раствор 29,96 г (250,75 ммоль, 20 мл) CHCl₃ в 20 мл CH₂Cl₂. Перемешивали реакционную смесь при $t_{\text{комн.}}$ 14°C в теч. 2,5 ч, при этом она сперва разогрелась до 30°C, а затем остыла до 17°C. Выдерживали при 14°C 48 ч, затем отфильтровали неорганический осадок NaCl – NaOH, промыли его 100 мл CH₂Cl₂. Из объединенного фильтрата отогнали CH₂Cl₂, остаток ректифицировали в вакууме. Получено 15,739 г (40,6 %) три-(*n*-бутил)ортоформиата, бесцветная жидкость с характерным запахом, т. кип. 103–105 °C (6 мм рт. ст.), n_D^{27} 1,4150, идентифицированного с заведомым образцом по спектру ПМР [1]. Спектр ЯМР ¹H (400 МГц, CDCl₃, σ , м.д.): 0,965 т (9H, OCH₂CH₂CH₂Me, ³*J* = 7,2 Гц), 1,430 секс (6H, OCH₂CH₂CH₂Me, ³*J* = 7,2 Гц), 1,591 квинт (6H, OCH₂CH₂CH₂Me, ³*J* = 7,2 Гц), 3,522 т (6H, OCH₂CH₂CH₂Me, ³*J* = 7,2 Гц), 5,084 с (1H, CH).

Триметилортоформиат. К 40 г (1000 ммоль) NaOH добавили при охлаждении 16,02 г (500 ммоль) абс. MeOH, затем через 10 мин. добавили при перемешивании раствор 0,20 г (0,50 ммоль) дибромида 1,8-бис(*N*-амино-*N,N*-диметиламмоний)-3,6-диоксаоктана **1** в 55 мл CH₂Cl₂, затем прикапали раствор 29,96 г (250,75 ммоль, 20 мл) CHCl₃ в 25 мл CH₂Cl₂. Перемешивали реакционную смесь 1 ч при 10 - 15°C, охлаждая водяной баней. Затем баню убрали, в течение 45 мин. реакционная смесь разогрелась до кипения (40 – 48 °C). Ввели наружное охлаждение водяной баней и добавили еще 55 мл CH₂Cl₂. Перемешивали еще 1 ч 20 мин, температура реакционной смеси в итоге упала до 25 °C. Выдерживали реакционную смесь 20 ч при этой температуре, затем отфильтровывали неорганический осадок, дважды промывая его отогнанным CH₂Cl₂ (90 мл). Из фильтратов отгоняли CH₂Cl₂, возвращая его на повторные промывки неорганического осадка. Объединенные кубы после отгонки CH₂Cl₂ подвергли фракционной перегонке, отбирая фракции 1) с т.кип. 92 - 98°C, 2) с т.кип. 99 - 100°C. Первую фракцию ректифицировали повторно. Получено 9,26 г (52,3%) триметилортоформиата, бесцветная жидкость, n_D^{26} 1,370, лит. n_D^{20} 1,3793 [5], идентифицированного по спектру ПМР и ГЖХ с заведомым образцом.

Список литературы: 1. Штамбург В.Г., Скобелев О.Л., Гринев В.М., Дмитренко А.А. Плешкова А.П., Притыкин Л.М. Синтез и использование α,ω -бис (*N,N*-диалкиламино)олигооксаалканов и их аналогов как катализаторов фазового переноса для получения триалкилортоформиатов в гетерогенных системах. // Журн. Орган. Хим. -1995. – т.31, № 3. – С.660 – 664. 2. Притыкин Л.М., Штамбург В.Г. Дмитренко А.А., Гринев В.М., Скобелев О.Л. Получение триалкилортоформиатов из хлороформа и спиртов в условиях меж фазного катализа. // Доп. НАН України. – 1995. - № 7. – С. 114 – 117. 3. Штамбург В.Г., Скобелев О.Л., Козак И.Ю., Гринев В.М., Дмитренко А.А., Омельницький В.Л. Способ получения триэтилортоформиата. // Авт. св. СССР № 1781203 (1990). Оpubл. в Б.И. -1992. - № 46. 4. Штамбург В.В., Паненко С.А., Мазепа А.В., Шишко А.Е., Дистанов В.Б., Штамбург В.Г. Синтез дибромидов 1,8-бис(триалкиламмоний)-3,6-триоксаоктанов и родственных соединений. // Вісн. Нац. Техн. Ун-ту «ХПІ». – 2012. - № 18. – С.88 – 90. 5. Свойства органических соединений. Справочник/ Под ред. А.А. Потехина // 1984. – Л., «Химия». – С.263.

Поступила в редколлегию 11.06.2012

В.В. ШТАМБУРГ, канд. хим. наук, ст. преп., НТУ «ХПИ», Харьков,
А.А. АНИЩЕНКО, канд. хим. наук, доц., ДНУ, Днепропетровск,
В.Г. ШТАМБУРГ, док. хим. наук, проф., НТУ «ХПИ», Харьков, ГВУЗ
 «УГХТУ», Днепропетровск,
А.В. МАЗЕПА, канд. хим. наук, с.н.с., Институт физической химии им. А.В.
 Богатского НАН Украины, Одесса

ХЛОРИРОВАНИЕ ПРОДУКТОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ 2-ТИЕНИЛГЛИОКСАЛЯ С АМИДАМИ КАРБОНОВЫХ КИСЛОТ И АРЕНСУЛЬФАМИДАМИ

Досліджено взаємодію 2-тієнілгліоксалу з уретаном, амідами карбонових кислот, *para*-нітроаніліном, аренсульфоніламидами. Була розглянута можливість використання нових похідних 2-тієнілгліоксалу в якості синтонів в органічному синтезі, шляхом їх модифікації в результаті N-хлорування.

Исследовано взаимодействие 2-тиенилглиоксала с уретаном, амидами карбоновых кислот, *para*-нитроанилином, аренсульфониламидами. Рассмотрена возможность использования новых производных 2-тиенилглиоксала в качестве синтонов в органическом синтезе, путем их модификации N-хлорированием.

Interaction of 2-thienylglyoxal with the urethane, carbonic acids amides, *p*-nitroaniline and arensulphonylamides has been studied. We have examined the possibility of using new 2-thienylglyoxals derivatives as synthones in organic syntheses by their modification with N-chlorination.

В отличие от арилглиоксалей, химические превращения 2-тиенилглиоксала исследованы эпизодически и неполно [1 - 5]. Поэтому, с одной стороны, представлялось важным проверить, имеются ли существенные различия в химических свойствах 2-тиенилглиоксала и арилглиоксалей, описанных, в основном, на примере фенилглиоксала. С другой стороны, представлялось целесообразным исследовать возможность синтеза на основе 2-тиенилглиоксала представителей вицинальных систем O-C-N-Cl, соединений **1** согласно следующей схеме (рис. 1).

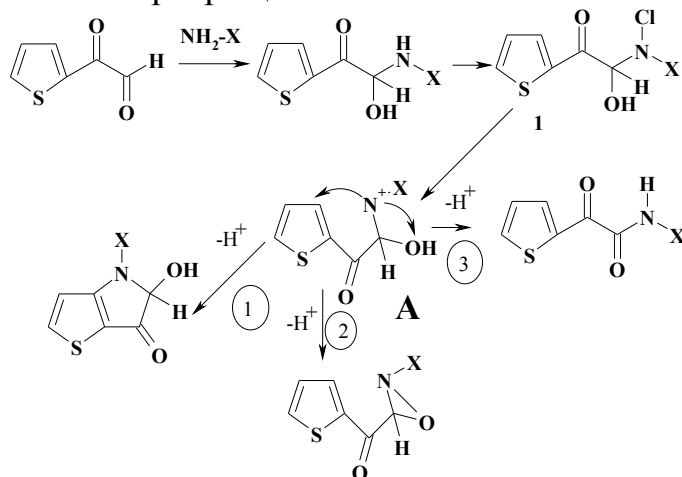


Рис. 1. Возможность синтеза на основе 2-тиенилглиоксала представителей O-C-N-Cl вицинальных систем

Гипотетические N-хлорсоединения **1** представлялись как возможные источники нитрениевого катиона **A**, последующие превращения которого могли оказаться новыми путями (пути 1, 2 схемы 1) синтеза гетероциклических соединений.

Нами найдено, что при действии уретана на 2-тиенилглиоксаль в среде бензола при комнатной температуре селективно образуется этил-*N*-[гидрокси-(2-еноил)]метилкарбамат **2** (рис. 2). Аналогичным образом амиды карбоновых кислот присоединяются по альдегидной группе 2-тиенилглиоксала с селективным образованием *N*-

[гидрокси-(2-еноил)]метиламидов карбоновых кислот **3 – 9** (рис. 3).

Структура полученных соединения доказана с помощью спектроскопии ЯМР ^1H , ИК-спектроскопии и масс-спектрометрии. В масс-спектре *N*-[гидрокси-(2'-еноил)]метил-4-фторбензида **7** (режим FAB, H^+), кроме пика иона $[\text{M}+\text{H}]^+$ с m/z 280 (61%), присутствуют пики характеристичных ионов с m/z 262 $[\text{M}-\text{OH}]^+$ (100%), с m/z 123 $\text{FC}_6\text{H}_4\text{C}(\text{O})^+$ (91%) и с m/z 111 $\text{C}_4\text{H}_3\text{SC}(\text{O})^+$ (20%). Основные пути фрагментации иона $[\text{M}+\text{H}]^+$ соединения **7** представлены на рис. 4.

Таким образом, взаимодействие 2-тиенилглиоксала с амидами карбоновых кислот и уретаном протекает таким же образом, как и для арилглиоксалий, существенных отличий не наблюдается.

В первичных спиртах (метаноле, этаноле) 2-тиенилглиоксальгидрат присоединяет по альдегидной группе *para*-нитроанилин, и НО-группа замещается на алкоксигруппу с селективным образованием относительно устойчивых полуаминалей-полуацеталей **10** и **11** (рис.5). Соединение **11** устойчиво при комнатной температуре несколько месяцев, затем начинает разлагаться.

Полуаминаль-полуацеталь **10** хранится без заметного разложения более двух лет.

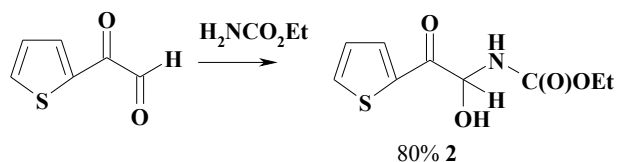
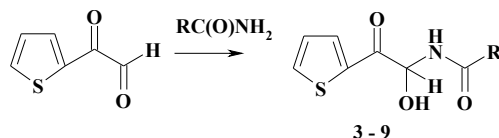


Рис. 2. Взаимодействие 2-тиенилглиоксала с уретаном



R = Me (**3**, 92%), Et (**4**, 69%), i-Bu (**5**, 75%), Ph (**6**, 91%), 4- FC_6H_4 (**7**, 85%), 3- $\text{C}_5\text{H}_4\text{N}$ (**8**, 90%), 4- $\text{C}_5\text{H}_4\text{N}$ (**9**, 94%)

Рис. 3. Взаимодействие 2-тиенилглиоксала с амидами карбоновых кислот

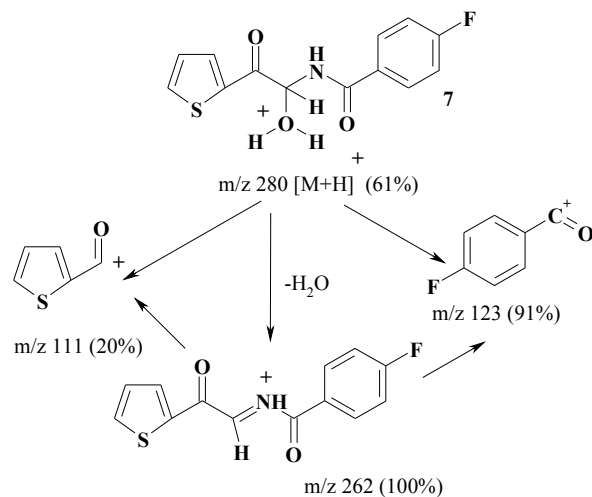
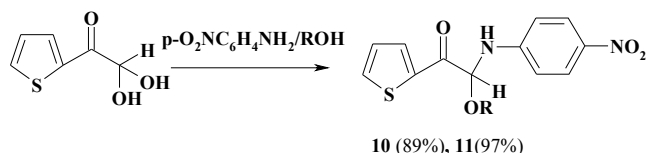


Рис. 4. Основные пути фрагментации иона $[\text{M}+\text{H}]^+$ *N*-[гидрокси-(2'-еноил)]метил-4-фторбензида **7**



R = Me (**10**), Et (**11**)

Рис. 5. Взаимодействие 2-тиенилглиоксала с *para*-нитроанилином в среде первичных спиртов

В кипящем бензоле безводный 2-тиенилглиоксаль образует с *para*-нитроанилином преимущественно полуаминаль **12** даже при 100% избытке *para*-нитроанилина (рис. 6). А в тех же условиях гидрат 2-тиенилглиоксала образует трудно разделяемую смесь полуаминала **12** и полного аминаля **13**. Добавочная обработка данной смеси *para*-нитроанилином в уксусной кислоте позволила получить аминаль **13** в чистом виде.

Структура соединения **12** доказана с помощью спектроскопии ЯМР ^1H и масс-спектрометрии. В масс-спектре соединения **12**, кроме пика иона $[\text{M}+\text{H}]^+$ с m/z 279 (74%), имеются пики характеристичных ионов с m/z 261 $[\text{M}-\text{OH}]^+$ (51%), m/z 139 $\text{C}_4\text{H}_3\text{SC}(\text{O})\text{C}(\text{O})^+$ (100%) и с m/z 111 $\text{C}_4\text{H}_3\text{SC}(\text{O})^+$ (35%) (рис. 7).

Таким образом, можно утверждать, что природа продуктов взаимодействия 2-тиенилглиоксала с *para*-нитроанилином определяется условиями проведения реакции.

Исследовано протекание взаимодействия 2-тиенилглиоксальгидрата с аренсульфонамидами. Найдено, что в среде уксусной кислоты при комнатной температуре селективно образуются *N*-[гидрокси-(2-теноил)]метиларенсульфонамиды **14** и **15** (рис. 8).

В кипящем бензоле 2-тиенилглиоксаль с бензол- и *para*-толуолсульфамидами образует бис-сульфамидные производные **16** и **17**, соответственно (схема 8). Те же бис-сульфамиды **16** и **17** образуются из *N*-[гидрокси-(2-теноил)]метиларенсульфонамидов **14** и **15** при длительном кипячении их

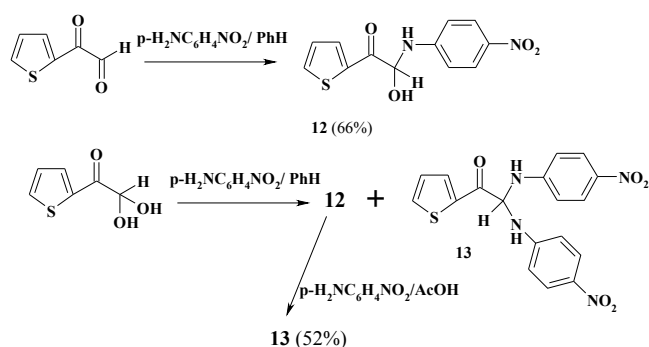


Рис 6. Взаимодействие 2-тиенилглиоксала с *para*-нитроанилином в бензоле

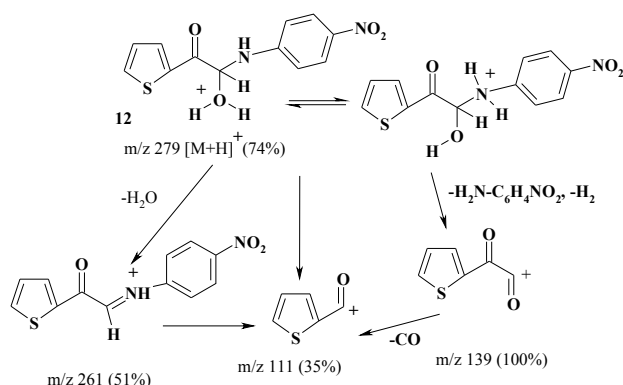


Рис. 7. Основные пути фрагментации иона $[\text{M}+\text{H}]^+$ полуаминала **12**

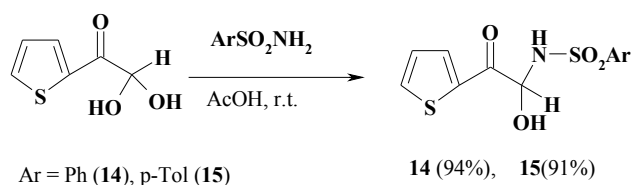


Рис. 8. Взаимодействие 2-тиенилглиоксала с аренсульфонамидами

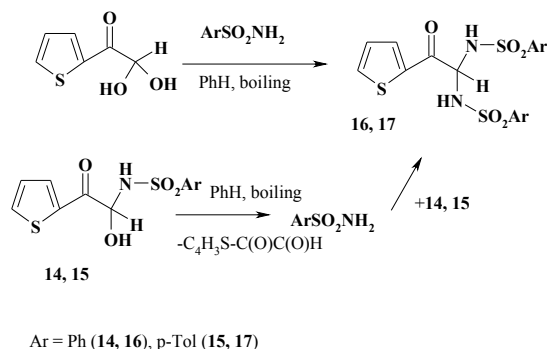


Рис. 9. Образование бис-сульфамидных производных 2-тиенилглиоксала

бензольного раствора, т.е. происходит диспропорционирование. По-видимому, в последнем случае это обусловлено частичным распадом моносulfамидов **14** и **15** до аренсульфамидов и 2-тиенилглиоксаля (рис. 9).

Таким образом, строение продуктов взаимодействия 2-тиенилглиоксаля с такими слабыми нуклеофилами как аренсульфонамиды так же определяется условиями проведения реакции.

Чтобы показать возможность использования новых производных 2-тиенилглиоксаля в качестве синтонов в органическом синтезе, мы исследовали возможность их модификации путем селективного хлорирования. Ожидалось три возможных

пути трансформации *N*-[гидрокси-(2-теноил)]метилкарбамата **2** и *N*-[гидрокси-(2-теноил)]метиларенсульфонила мидов под действием такого селективного хлорирующего агента, как *трет*-бутилгипохлорит (рис. 10).

Это либо хлорирование по атому азота с образованием *N*-хлорпроизводных **1** (путь 1 схемы 10), либо хлорирование в тиофеновое ядро [6] (путь 2 схемы 10), либо окисление до производного 2-теноилмуравьиной кислоты (2-тиенилглиоксалевой кислоты) [3] (путь 3 схемы 10). Однозначно предсказать направление хлорирования не представлялось возможным.

Найдено, что длительная обработка производного уретана **2** *трет*-

бутилгипохлоритом приводит к селективному образованию продукта *N*-хлорирования, соединению **18** (рис. 11). Длительное выдерживание *N*-[1-(2'-теноил)-1-(гидроксиметил)]-бензамида **6** с большим избытком *трет*-бутилгипохлорита не позволило получить *N*-хлор-*N*

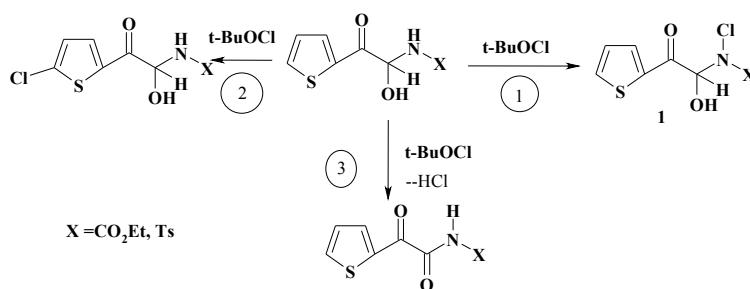


Рис. 10. Возможные направления хлорирования аддуктов взаимодействия 2-тиенилглиоксаля с *N*-нуклеофилами

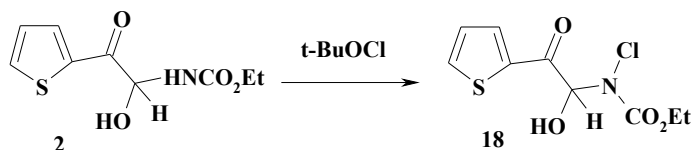


Рис. 11. Хлорирование этил-*N*-[гидрокси-(2-теноил)]метилкарбамата **2** *трет*-бутилгипохлоритом

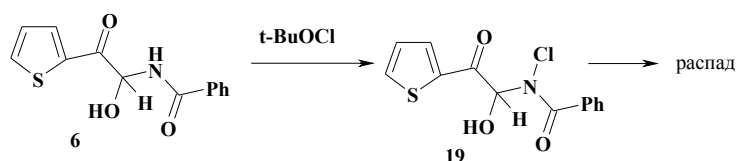


Рис. 12. Хлорирование *N*-[1-(2'-теноил)-1-(гидроксиметил)]бензамида **6** *трет*-бутилгипохлоритом

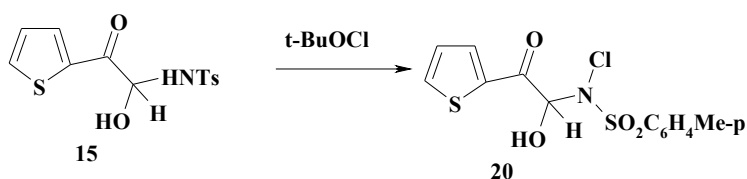


Рис. 13. Хлорирование *N*-1-(2'-теноил)-1-(гидроксиметил)тозиламида **15** *трет*-бутилгипохлоритом

-[1-(2'-теноил)-1-(гидроксиметил)]бензамид **19** вследствие его дальнейшего распада и неустойчивости (рис. 12).

Хлорирование N-1-(2'-теноил)-1-(гидроксиметил)тозиламида **15** *трет*-бутилгипохлоритом при 20-22 °С в среде метиленхлорида протекает по атому азота с образованием N-хлор-N-[1-(2'-теноил)-1-(гидроксиметил)]тозиламида **20** (рис.13).

Структура полученных соединений **18** и **20** подтверждена данными спектроскопии ЯМР ^1H и масс-спектрометрии.

Таким образом установлено, что хлорирование аддуктов 2-тиенилглиоксаля с уретаном и аренсульфониламидами *трет*-бутилгипохлоритом при комнатной температуре протекает селективно с образованием соответствующих N-хлорпроизводных. Исследование химических свойств N-хлорсоединений **18** и **20** представляется актуальным.

Экспериментальная часть

Спектры ЯМР ^1H регистрировали на спектрометрах "Varian VXR-300" (300 МГц) Me_4Si в качестве внутреннего стандарта; приведены значения δ , м.д., КССВ (J), Гц. ИК-спектры записывали на спектрометре UR-20 в таблетках KBr. Масс-спектры записаны в режиме FAB (Fast Atom Bombarded), метод десорбционной ионизации, H^+ -матрица или Na^+ -матрица) на приборе VG 70-10EQ. Растворители абсолютировали стандартными методами: ацетонитрил и дихлорметан кипятили и перегоняли над оксидом фосфора (V), бензол и гексан - над натрием, метанол и этанол - над кальцием.

N-[Гидрокси-(2-теноил)]метил-карбоксамиды (2 – 9) (Типовая методика). Раствор 0,70 г (5,0 ммоль) 2-тиенилглиоксаля и 5 ммоль амид карбоновой кислоты в 10 мл бензола выдерживали 3 суток при 20 - 23 °С, упаривали наполовину в вакууме, отфильтровывали выпавший осадок, мыли холодным бензолом, сушили у вакууме при 2 мм рт. ст. Таким образом получены:

Этил-N-[гидрокси-(2-теноил)]метил-карбамат (2), выход 80 %, бесцветные кристаллы, т.пл. 105 - 106 °С. Спектр ЯМР ^1H (300 МГц, CDCl_3): 1,28 т (3H, $\text{CO}_2\text{CH}_2\text{Me}$, $^3J=7,2$ Гц); 4,20 кв (2H, $\text{CO}_2\text{CH}_2\text{Me}$, $^3J=7,2$ Гц); 4,42 уш. с (1H, NH); 5,91 уш. с (1H, CH); 6,17 уш. с (1H, OH); 7,20 т (1H, H_{Th}^4 , $^3J=4,8$ Гц); 7,78 д (1H, H_{Th}^5 , $^3J=4,8$ Гц); 8,04 д (1H, H_{Th}^3 , $^3J=3,0$ Гц). ИК-спектр (ν , cm^{-1}): 3410 (OH), 3330 (NH), 1690 (C=O), 1670 (C=O). Масс-спектр (FAB, H^+ , m/z, $I_{\text{отн.}}(\%)$): 230 $[\text{M}+\text{H}]^+$ (17), 212 $[\text{M}+\text{H}-\text{H}_2\text{O}]^+$ (100). Масс-спектр (FAB, K^+ , m/z, $I_{\text{отн.}}(\%)$): 268 $[\text{M}+\text{K}]^+$ (100). Найдено, % : N 6,23. $\text{C}_9\text{H}_{11}\text{NO}_4\text{S}$. Вычислено, %: N 6,11.

N-[Гидрокси-(2-теноил)]метил-ацетамид (3), выход 92 %, бесцветные кристаллы, т.пл. 127-128 °С. Спектр ЯМР ^1H (300 МГц, $(\text{CD}_3)_2\text{SO}$): 1,81 с (3H, $\text{MeC}(\text{O})$); 6,09 д (1H, CHON , $^3J=6,8$ Гц); 6,64 уш. с (1H, OH); 7,18 т (1H, H_{Th}^4 , $^3J=4,2$ Гц); 7,87 д (1H, H_{Th}^3 , $^3J=3,0$ Гц); 7,97 д (1H, H_{Th}^5 , $^3J=4,2$ Гц); 8,77 д (1H, NH, $^3J=6,8$ Гц). ИК-спектр (ν , cm^{-1}): 3380 (OH), 3280 (NH), 1648 (C=O), 1625 (C=O). Масс-спектр (FAB, H^+ , m/z, $I_{\text{отн.}}(\%)$): 200 $[\text{M}+\text{H}]^+$ (100), 182 $[\text{M}+\text{H}-\text{H}_2\text{O}]^+$ (90); 140 (73); 111 (25). Найдено % : N 6,95. $\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}_3\text{S}$. Вычислено, %: N 7,03.

N-[Гидрокси-(2'-теноил)]метил-пропиониламид (4), выход 69 %, бесцветные кристаллы, т.пл. 107-108 °С. Спектр ЯМР ^1H (300 МГц, CDCl_3): 1,27 т (3H, CH_2Me , $^3J=7,2$ Гц); 4,19 кв (2H, CH_2Me , $^3J=7,2$ Гц); 4,55 уш. с (1H, NH); 6,00 уш.

с (1H, CH); 6,16 уш. с (1H, OH);); 7,19 т (1H, H_{Th}⁴, ³J=4,2 Гц); 7,77 д (1H, H_{Th}⁵, ³J=4,2 Гц); 8,02 д (1H, H_{Th}³, ³J=3,0 Гц). Найдено, %: N 6,32. C₉H₁₁NO₃S. Вычислено, %: N 6,57.

N-[Гидрокси-(2'-теноил)]метил-3-метилбутаноиламид (5), выход 75%, бесцветные кристаллы, т. пл. 90 - 92 °С. Спектр ЯМР ¹H (300 МГц, CDCl₃): 0,95 д и 0,96 д (6H, Me₂CH, ³J = 7,0 Гц); 2,15 д и нонет (3H, CH₂CHMe₂, ³J=7,0 Гц); 4,86 уш. с (1H, NH); 6,38 д (1H, CHNH, ³J=7,5 Гц); 6,92 уш. с (1H, OH); 7,18 т (1H, H_{Th}⁴, ³J = 4,1 Гц); 7,78 д (1H, H_{Th}⁵, ³J = 4,1 Гц); 8,10 д (1H, H_{Th}³, ³J=3,0 Гц). Масс-спектр (FAB, H⁺, m/z, I_{отн.}(%)): 242 [M+H]⁺ (42), 224 [M+H-H₂O]⁺ (58), 140(100); 111 (11); 85 (27). Найдено, %: N 5,92. C₁₁H₁₅NO₃S. Вычислено, %: N 5,80.

N-[Гидрокси-(2-теноил)]метилбензамид (6), выход 91%, бесцветные кристаллы, т.пл. 149 - 151 °С. Спектр ЯМР ¹H (300 МГц, (CD₃)₂SO): 6,34 т (1H, CH(OH)NH, ³J = 6,2 Гц); 6,72 д (1H, CHOH, ³J=6,2 Гц); 7,24 т (1H, H_{Th}⁴, ³J=4,3 Гц); 7,47 т (2H, H_{Ph}^{3,5}, ³J=7,8 Гц); 7,53 т (1H, H_{Ph}⁴, ³J=7,8); 7,92 д (2H, H_{Ph}^{2,6}, ³J=7,8 Гц); 7,97 д (1H, H_{Th}³, ³J=3,7 Гц); 8,01 д (1H, H_{Th}⁵, ³J=4,3 Гц); 9,44 д (1H, CHNH, ³J=6,2 Гц). ИК-спектр (ν, см⁻¹): 3400 (OH), 3345 (NH), 1682 (C=O), 1643 (C=O). Масс-спектр (FAB, H⁺, m/z, I_{отн.}(%)): 262 [M+H]⁺ (90), 244 [M+H-H₂O]⁺ (88), 111 (14); 105 Bz⁺ (100). Найдено (%) : N 5,22. C₁₃H₁₁NO₃S. Вычислено (%): N 5,35.

N-[Гидрокси-(2'-теноил)]метил-4-фторбензамид (7), выход 85%, бесцветные кристаллы, т.пл. 126 - 127 °С. Спектр ЯМР ¹H (300 МГц, CDCl₃): 4,96 д (1H, CHNH, ³J=6,3 Гц); 6,51 т (1H, CH(OH)NH, ³J=6,3 Гц); 7,07 дд (2H, H_{C6H4}^{3,5}, ³J=13,0 Гц); 7,13 т (1H, H_{Th}⁴, ³J=6,6 Гц); 7,64 д (1H, CHOH, ³J=6,3 Гц); 7,73 д (1H, H_{Th}⁵, ³J=6,6 Гц); 7,81 дд (1H, H_{C6H4}^{2,6}, ³J=13,0 Гц); 8,09 д (1H, H_{Th}³, ³J=4,2 Гц). Масс-спектр (FAB, H⁺, m/z, I_{отн.}(%)): 280 [M+H]⁺ (61), 262 [M+H-H₂O]⁺ (100), 123 [FC₆H₄CO]⁺ (91), 111 [C₄H₃SCO]⁺ (20). Найдено (%) : N 4,95. C₁₃H₁₀FNO₃S. Вычислено (%): N 5,02.

N-[Гидрокси-(2'-теноил)]метил-3-пиридилкарбоксамида (8), выход 90 %, бесцветные кристаллы, т.пл. 148 - 151 °С. Спектр ЯМР ¹H (300 МГц, (CD₃)₂SO): 6,38 д (1H, CHNH); 6,86 уш. с (1H, OH); 7,26 т (1H, H_{Th}⁴); 7,53 т (1 H, H_{Py}⁵); 8,00 д (1H, H_{Th}³); 8,03 д (1H, H_{Th}⁵); 8,27 д (1H, H_{Py}⁶); 8,73 д (1H, H_{Py}⁴); 9,06 с (1H, H_{Py}²); 9,65 д (1H, NH). Найдено, %: N 10,57; S 12,14. C₁₂H₁₀N₂O₃S. Вычислено, %: N 10,68 ; S 12,22.

N-[Гидрокси-(2'-теноил)]метил-4-пиридилкарбоксамида (5.9), выход 83,7 %, бесцветные кристаллы, т.пл. 135 - 137 °С. Спектр ЯМР ¹H (300 МГц, (CD₃)₂SO): 6,35 д (1H, CHNH, ³J=7,8 Гц); 5,96 уш. с (1H, OH); 7,25 т (1H, H_{Th}⁴, ³J=4,0); 7,82 д (2H, H_{Py}^{3,5}, ³J=5,7 Гц); 7,99 д (1H, H_{Th}³, ³J=3,4 Гц); 8,05 д (1H, H_{Th}⁵, ³J=4,0 Гц); 8,74 д (2H, H_{Py}^{2,6}, ³J=5,7 Гц); 9,76 д (1H, CHNH, ³J=7,8 Гц). Масс-спектр (FAB, H⁺, m/z, I_{отн.}(%)): 263 [M+H]⁺ (100), 245 [M+H-H₂O]⁺ (56), 122 (48); 111 (12); 106 (25). Найдено, % : N 10,53; S 12,37. C₁₂H₁₀N₂O₃S. Вычислено, %: N 10,68 ; S 12,22.

2-Метокси-2-(4''-нитрофениламино)-1-(2'-тиенил)-этанон-1 (10). Смесь 0,79 г (5,0 ммоль) 2-тиенилглиоксальгидрата, 0,69 г (5 ммоль) 4-нитроанилина и 15 мл метанола кипятили 3 ч, выдерживали 1 сутки при 20 °С. Выпавший осадок отфильтровали, промыли 3 мл метанола, сушили при 3 мм рт. ст. Получено 1,30 г

(88,9 %) соединения **10**, желтые кристаллы, т.пл. 143 - 144 °С. Спектр ЯМР ^1H (300 МГц, CDCl_3): 3,27 с (3H, OMe); 6,14 д (1H, CHNH , $^3J = 7,2$ Гц); 7,08 д (2H, $\text{H}_{\text{C}_6\text{H}_4}^{2,6}$, $^3J = 9,0$ Гц); 7,31 т (1H, H_{Th}^4 , $^3J = 4,1$ Гц); 8,04 д (1H, CHNH , $^3J = 7,2$ Гц); 8,10 д (2H, $\text{H}_{\text{C}_6\text{H}_4}^{3,5}$, $^3J = 9,0$ Гц); 8,12 д (1H, H_{Th}^5 , $^3J = 4,1$ Гц); 8,15 д (1H, H_{Th}^3 , $^3J = 3,2$ Гц). ИК-спектр (ν , cm^{-1}): 3350 (NH), 3005 (OMe), 1640 (C=O), 1588 (NO_2), 1325 (NO_2). Масс-спектр (FAB, H^+ , m/z , $I_{\text{отн.}}(\%)$): 293 $[\text{M}+\text{H}]^+$ (62), 261 $[\text{M}+\text{H}-\text{MeOH}]^+$ (56), 243 (32); 181 (100); 111 (15). Найдено, %: N 9,47; S 10,70. $\text{C}_{13}\text{H}_{12}\text{N}_2\text{O}_4\text{S}$. Вычислено, %: N 9,58; S 10,97.

2-Этокси-2-(4''-нитрофениламино)-1-(2'-тиенил)-этанон-1 (11) получен по аналогичной методике с выходом 97 %, желтые кристаллы, т.пл. 134 -135 °С. Спектр ЯМР ^1H (300 МГц, $(\text{CD}_3)_2\text{SO}$): 1,03 т (3H, CH_2Me , $^3J = 7,0$); 3,49 к (2H, CH_2Me , $^3J = 7,0$ Гц); 6,05 д (1H, CHNH , $^3J = 8,1$ Гц); 6,97 д (2H, $\text{H}_{\text{C}_6\text{H}_4}^{2,6}$, $^3J = 9,0$ Гц); 7,23 т (1H, H_{Th}^4 , $^3J = 4,3$ Гц); 7,94 д (1H, CHNH , $^3J = 8,1$ Гц); 7,99 д (2H, $\text{H}_{\text{C}_6\text{H}_4}^{3,5}$, $^3J = 9,0$ Гц); 8,02 д (1H, H_{Th}^5 , $^3J = 4,3$ Гц); 8,06 д (1H, H_{Th}^3 , $^3J = 3,2$ Гц). Найдено, %: N 9,07. $\text{C}_{14}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{O}_4\text{S}$. Вычислено, %: N 9,14.

2-Гидрокси-2-(4''-нитрофениламино)-1-(2'-тиенил)-этанон-1 (12).

Раствор 0,49 г (3,50 ммоль) 2-тиенилглиоксала и 0,967 г (7,0 ммоль) 4-нитроанилина в 35 мл бензола кипятили 4 ч. Из горячей реакционной смеси отфильтровали выпавший осадок, мыли 5 мл бензола. Получено 0,645 г (66,2 %) 2-гидрокси-2-(4''-нитрофениламино)-1-(2'-тиенил)-этанона-1 **12**, желтые кристаллы, т.пл. 150-151 °С. Спектр ЯМР ^1H (300 МГц, $(\text{CD}_3)_2\text{SO}$): 6,12 т (1H, CH, $^3J = 7,5$ Гц); 6,78 д (1H, CHON , $^3J = 7,5$ Гц); 7,03 д (2H, $\text{H}_{\text{C}_6\text{H}_4}^{2,6}$, $^3J = 9,6$ Гц); 7,30 т (1H, H_{Th}^4 , $^3J = 4,2$ Гц); 7,94 д (1H, NH, $^3J = 7,5$ Гц); 8,07 д (2H, $\text{H}_{\text{C}_6\text{H}_4}^{3,5}$, $^3J = 9,6$ Гц); 8,08 д (1H, H_{Th}^3 , $^3J = 3,0$ Гц); 8,10 д (1H, H_{Th}^5 , $^3J = 4,2$ Гц). ИК-спектр (ν , cm^{-1}): 3420 (OH), 3338 (NH), 1630 (C=O), 1588 (NO_2), 1320 (NO_2). Масс-спектр (FAB, H^+ , m/z , $I_{\text{отн.}}(\%)$): 279 $[\text{M}+\text{H}]^+$ (74), 261 $[\text{M}-\text{OH}]^+$ (51), 139 (100), 111 (35). Найдено, %: N 9,86. $\text{C}_{12}\text{H}_{10}\text{N}_2\text{O}_4\text{S}$. Вычислено, %: N 10,07.

2-Ди-(4''-нитрофениламино)-1-(2'-тиенил)-этанон-1 (13) А) Раствор 0,554 г (3,50 ммоль) 2-тиенилглиоксальгидрата и 0,97 г (7,0 ммоль) 4-нитроанилина в 40 мл бензола кипятили с насадкой Дина-Старка 2 ч, отфильтровали горячим выпавший осадок, мыли 7 мл бензола, 10 мл ацетонитрила. Желтый осадок, являющийся, согласно данным спектра ЯМР ^1H , смесью соединений **12** и **13** в соотношении 44:56 мольн.%, перемешивали с раствором 0,170 г (1,236 ммоль) 4-нитроанилина в 10 мл AcOH . Отфильтровали желтый осадок, промыли 3 мл AcOH , 3 мл ацетонитрила, сушили 10 ч при 20 °С и 3 мм рт. ст. Получено 0,776 г (55 %) 2-ди-(4''-нитрофениламино)-1-(2'-тиенил)-этанона-1 **13**, желтые кристаллы, т. пл. 134 – 137 °С. Спектр ЯМР ^1H (300 МГц, $(\text{CD}_3)_2\text{SO}$): 6,45 т (1H, $\text{CH}(\text{NH})_2$, $^3J = 7,2$ Гц); 6,85 д (4H, $\text{H}_{\text{Ph}}^{2,6}$, $^3J = 8,7$ Гц); 7,22 т (1H, H_{Th}^4 , $^3J = 4,6$ Гц); 7,95 д (4H, $\text{H}_{\text{Ph}}^{3,5}$, $^3J = 8,7$ Гц); 8,0 д (1H, H_{Th}^5 , $^3J = 4,6$ Гц); 8,07 д и д (3H, H_{Th}^5 и NH). Масс-спектр (FAB, H^+ , m/z , $I_{\text{отн.}}(\%)$): 399 $[\text{M}+\text{H}]^+$ (23), 287 (100). Найдено, %: N 14,20. $\text{C}_{18}\text{H}_{14}\text{N}_4\text{O}_5\text{S}$. Вычислено, %: N 14,39.

N-[Гидрокси-(2-теноил)-метил]бензолсульфониламид (14). Смесь 0,200 г (1,273 ммоль.) 2-тиенилглиоксальгидрата, 0,200 г (1,273 ммоль) бензолсульфамида и 10 мл уксусной кислоты перемешивали 24 ч при 20 °С, выдерживали еще сутки, затем удалили уксусную кислоту в вакууме 2 мм рт. ст.

при 20 °С, остаток промыли 25 мл Et₂O, 1 мл гексана. Получено 0,352 г (94%) *N*-(гидрокси-(2-теноил)-метил)бензолсульфониламида **14**, бесцветные кристаллы, т.пл. 115 – 117 °С. Спектр ЯМР ¹H (300 МГц, (CD₃)₂SO): 5,86 т (1H, CH, ³J=9,3 Гц); 6,70 д (1H, OH, ³J = 9,3 Гц); 7,28 т (1H, H_{Th}⁴, ³J = 4,5 Гц); 7,59 т и т (3H, H_{Ph}^{3,5} и H_{Ph}⁴, ³J = 6,6 Гц); 7,89 д (2H, H_{Ph}^{2,6}, ³J = 6,6 Гц); 8,01 д (1H, H_{Th}³, ³J = 3,5 Гц); 8,07 д (1H, H_{Th}⁵, ³J = 4,5 Гц); 8,97 д (1H, NH, ³J = 9,3 Гц). ИК-спектр (ν, см⁻¹): 3390 (OH), 3273 (NH), 1670 (C=O), 1338 (SO₂), 1164 (SO₂). Найдено, % : N 4,50. C₁₂H₁₁NO₄S₂. Вычислено, %: N 4,71.

***N*-[Гидрокси-(2-теноил)-метил]-4-толуолсульфониламид (15)** получен по аналогичной методике с выходом 91 %, бесцветные кристаллы, т.пл. 151-155 °С (с разл.). Спектр ЯМР ¹H (300 МГц, (CD₃)₂SO): 2,39 с (3H, Me); 6,16 д.д (1H, CH(OH)NH, ³J = 9,6 Гц, ³J = 7,2 Гц); 6,94 д (1H, CHOH, ³J = 7,2 Гц); 7,59 т (1H, H_{Th}⁴, ³J = 4,5 Гц); 7,68 д (2H, H_{C₆H₄}^{3,5}, ³J = 8,1 Гц); 8,08 д (2H, H_{C₆H₄}^{2,6}, ³J = 8,1 Гц); 8,31 д (1H, H_{Th}³, ³J = 2,7 Гц); 8,40 д (1H, H_{Th}⁵, ³J = 4,5 Гц); 9,16 д (1H, CHNH, ³J = 9,6 Гц). ИК-спектр (ν, см⁻¹): 3405 (OH), 3269 (NH), 1700 (C=O), 1348 (SO₂), 1170 (SO₂). Масс-спектр (FAB, H⁺, m/z, I_{отн.}(%)): 294 [M+H⁺-H₂O]⁺ (100). Найдено, % : N 4,64; S 20,32. C₁₃H₁₃NO₄S₂. Вычислено, %: N 4,50; S 20,59

***N,N'*-(2-Теноилметилен)-бисбензолсульфониламид (16)** Раствор 0,40 г (1,35 ммоль) соединения **14** в 10 мл бензола кипятили 11 ч, отфильтровали горячим выпавший осадок, мыли 10 мл горячего бензола. Получено 0,27 г (92 %) *N,N'*-(2-теноилметилен)-бисбензолсульфониламида **16**, бесцветные кристаллы, т. пл. 185 - 187 °С. Спектр ЯМР ¹H (300 МГц, (CD₃)₂SO): 6,05 т (1H, CH, ³J = 9,3 Гц); 7,26 т (1H, H_{Th}⁴, ³J = 4,8 Гц); 7,46 т (4H, H_{Ph}^{3,5}, ³J = 7,2 Гц); 7,57 т (2H, H_{Ph}⁴, ³J = 7,2 Гц); 7,70 д (4H, H_{Ph}^{2,6}, ³J = 7,2 Гц); 7,85 д (1H, H_{Th}³, ³J = 3,6 Гц); 8,09 д (1H, H_{Th}⁵, ³J = 4,8 Гц); 9,02 д (2H, NH, ³J = 9,3 Гц). Масс-спектр (FAB, H⁺, m/z, I_{отн.}(%)): 437 [M+H]⁺ (5); 154 (100). Найдено, % : N 6,31. C₁₈H₁₆N₂O₅S₃. Вычислено, %: N 6,42.

Соединение **16** так же получено с выходом 38% при 10-часовом кипячении эквимольных количеств 2-тенилглиоксала и бензолсульфамида в бензоле.

***N,N'*-(2'-Теноилметилен)-бис-4-толуолсульфониламид (17)** получили по аналогичной методике с выходом 74 % из соединения **15**, бесцветные кристаллы, т. пл. 197 – 200 °С. Спектр ЯМР (300 МГц, (CD₃)₂SO): 2,34 с (6H, Me); 6,01 т (1H, CH, ³J=9,0 Гц); 7,24 д и т (5H, H_{C₆H₄}^{3,5}, ³J = 8,0 Гц, и H_{Th}⁴); 7,56 д (4H, H_{C₆H₄}^{2,6}, ³J = 8,0 Гц); 7,84 д (1H, H_{Th}³, ³J = 3,5 Гц); 8,09 д (1H, H_{Th}⁵, ³J = 4,2 Гц); 8,84 д (2H, CHNH, ³J = 9,0 Гц). ИК-спектр (ν, см⁻¹): 3278 (NH), 3250 (NH), 1640 (C=O), 1345 (SO₂), 1170 (SO₂). Найдено, % :N 5,84; S 20,42. C₂₀H₂₀N₂O₅S₃. Вычислено, %: N 6,03 ; S 20,70.

***N*-Хлор-*N*-[1-(2'-теноил)-1-(гидроксиметил)]уретан (18).** Смесь 0,229 г (1 ммоль) соединения **2** и раствор 0,455 г (4,19 ммоль) *трет*-бутилгипохлорита в 10 мл дихлорметана перемешивали 48 ч при 19-21 °С, фильтровали, фильтрат упаривали в вакууме 25 мм рт. ст., остаток выдерживали 2 ч при 20 °С и 3 мм рт. ст. Получено 0,228 г (95 %) *N*-хлор-*N*-[1-(2'-теноил)-1-(гидроксиметил)]уретан **18**, желтоватая вязкая жидкость. Спектр ЯМР ¹H (300 МГц, CDCl₃): 1,37 т (3H, CO₂CH₂Me, ³J = 7,2 Гц); 4,35 д кв (2H, CO₂CH₂Me, ³J = 7,2 Гц, *J*^{ем} = 2,1 Гц), 6,62 с (1H, CH); 7,21 т (1H, H_{Th}⁴, ³J = 4,2 Гц); 7,82 д (1H, H_{Th}⁵, ³J = 4,5 Гц); 7,96 д (1H, H_{Th}³, ³J = 3,9 Гц). Масс-спектр (FAB, H⁺, m/z, I_{отн.}(%)): 248 [M+H⁺-H₂O]⁺ (7); 246

$[M+H^+-H_2O]^+$ (26); 57 (100). Найдено (%): Cl 14,25. $C_7H_{10}ClNO_4S$. Вычислено (%): Cl 14,79.

N-Хлор-N-[1-(2'-теноил)-1-(гидроксиметил)]тозиламид (20). Смесь 0,311 г (1,00 ммоль) соединения **15** и раствор 0,910 г (8,38 ммоль) *трет*-бутилгипохлорита в 10 мл дихлорметана перемешивали 55 ч при 19-21 °С. Раствор упаривали в вакууме 25 мм рт. ст., остаток промыли 2 мл гексана, сушили в вакууме 3 мм рт. ст. Получено 0,311 г (90 %) *N*-хлор-*N*-[1-(2'-теноил)-1-(гидроксиметил)]тозиламида **20**, бесцветное кристаллическое вещество. Спектр ЯМР 1H (300 МГц, $CDCl_3$): 2,48 с (3H, Me); 4,78 уш. с (1H, OH); 6,64 уш. с (1H, CH₂); 7,26 т (1H, H_{Th}⁴, $^3J=4,5$ Гц), 7,39 д (2H, H_{Ar}^{3,5}, $^3J=8,4$ Гц); 7,85 д д (1H, H_{Th}⁵, $^3J=5,1$ Гц, $J=0,9$ Гц) 7,93 д (2H, H_{Ar}^{2,6}, $^3J=8,4$ Гц); 8,25 д д (1H, H_{Th}³, $^3J=3,9$ Гц, $J=0,9$ Гц). Масс-спектр (FAB, H⁺, m/z, I_{отн.}(%)): 348 $[M+H]^+$ (5); 348 $[M+H]^+$ (14); 330 $[M+H^+-H_2O]^+$ (46); 328 $[M+H^+-H_2O]^+$ (100). Найдено (%): Cl 10,04. $C_{13}H_{12}ClNO_4S_2$. Вычислено (%): Cl 10,25.

Список литературы: 1. Жунгвету Г.И., Чухрий Ф.Н. / Взаимодействие индола с α -кетоальдегидами // Ж. Всес. Хим. о-ва им. Д.И. Менделеева – 1970. – Т.15, №3. – С.353 – 354. 2. Штамбург В.Г., Аніщенко А.О., Івонін С.П. / 3-Арил-2-фурилхіноксаліни // Міжнародна конференція «Хімія азотовмісних гетероциклів», 2-5 жовтня 2000 р., Харків. Тез доп. – 2000. – С.117. 3. Ровинский М.С., Долюк В.Г., Штамбург В.Г., Кремлев М.М. / Некоторые превращения 2-тиенилглиоксала // Всп. хим. и хим. технологии. – 1977. – Вып.47. – С. 6- 11. 4. Вінник А.О., Рябовол Я.І., Замігайло Л.Л. / Трикомпонентна однореакторна конденсація 4-гідроксикумарину, арилгліоксалів та тіосечовини // VII Всеукраїнська конференція мол. вчених та студентів з актуальних питань хімії. – Дніпропетровськ, 2009. – Тез. доп., С.148. 5. Ровинский М.С., Долюк В.Г., Жуховицкий В.Б., Штамбург В.Г., Кремлев М.М. / Получение 3-арилхиноксалонов // Хим. гетероцикл. соедин. – 1977. - № 6. – С. 819 – 820. 6. McGillivray G., ten Krooden E./ Chlorination with t-butylhypochlorite in the presence of alcohols. Part 2. Effect of structure of alcohol and order of addition of reactants, on the reactions of substituted thiophene // South Africa Journ. Chem. – 1989. – V. 42, No 3. – P.113 -119.

Поступила в редколлегию 15.06.2012

ЗМІСТ

О.В. Фомін Сучасні вимоги до конструкцій залізничних напіввагонів, які проектуються чи модернізуються	3
Ю.В. Доценко, В.Ю. Селиверстов Использование комбинированного на расплав системы Al-Si при затвердевании	7
А.А. Келемеш Классификация вибрационных процессов	16
С. Костелов, І. Коноваленко Застосування математичного моделювання для автоматизації процесу ремонту і проведення випробувань колектора основного паливного вузла ГТД	19
Є.А.Астахов, В. В. Артемчук Нанесення шаруватих аморфізованих відновлювальних газотермічних покриттів	28
О.О. Гончарук, Л.Ф.Головко, В.Г.Сороченко, А.М.Лутай, О.Д. Кагляк Вплив лазерного опромінення з різною довжиною хвилі на міцнісні характеристики кубічного нітриду бору	37
Л.Д. Мелконов Определение зависимости температуры резанья от режимов резания и угла скрещивания при чистовом точении валов чашечными принудительно вращающимися резцами	44
В.В. Барчан Синтез оптимальної системи вимірювання коефіцієнта динамічності мостових споруд	49
М.В. Волченко Оптимизация алгоритма резолюции в логике высказываний при помощи 0,1-ного представления дизъюнктов	55
М.В. Захарченко, В.Й. Кільдішев, Ю.В. Бєлова, С.В. Хомич Вплив корельованих завад на пропускну здатність безперервного каналу зв'язку	62
Н.А. Зубрецкая, С.С. Федин Прогнозирование показателей качества проектируемых изделий методом многомерной пространственной экстраполяции	68
Є.П. Пістун, Р.Я. Грудецький Автоматизована система побудови математичної моделі газогідродинамічних дросельних схем	72

Н.У. Гюлев, В.К. Доля, М.И. Крамарова Об изменении функционального состояния водителя-меланхолика в транспортном заторе	77
А.В. Гадяцкий, В.С. Качер, Ю.Н. Задерей, Л.К. Роман, И.Н. Василенко Оценка результатов ортезирования нижних конечностей с использованием цифровых фотокамер с большой дисторсией	81
А.М. Котенко, П.С. Шилаєв, А.В. Світлична Підвищення ефективності контрейлерних перевезень вантажів	87
Л.А. Борковская, А.В. Борковский, О.Ю. Бондарь, Ю.Т. Кобылецкий Компьютерная система классификации деталей	95
С.В. Ільїн Способи інтенсифікації процесів відводу теплоти від котушок дискових обмоток трансформатора	99
Є.Є. Чайковська Енергозберігаючі технології на рівні прийняття рішень	103
О.В. Потетенко, О.М. Гришин, Л.Р. Радченко, Л.К. Яковлева, Е.С. Крупа, О.С. Вахрушева, А.А. Гулахмадов Рабочий процесс радиально-диагональной гидротурбины (РОД). Методика построения прогнозной универсальной характеристики	109
І.М.Озарків, М.І. Данчук, В.С.Козар Методика розрахунку основних характеристик плоского геліотермічного колектора	119
О.І. Косенко, А.Д. Кустовська Дослідження закономірностей модифікування структури феросилікагелів	129
В.О. Скачков, В.І. Іванов, С.А.Воденніков, Ю.В. Мосейко Про кінетичні параметри осадження боруна поверхні вуглецевих волокон	135
А.Г. Галстян Исследование реакции изомерных ацетиламинотолуолов с озоном в жидкой фазе в присутствии марганецбромидного катализатора	140
В.В. Штамбург, В.Г. Штамбург, А.Е. Шишко Новый катализатор межфазного переноса для синтеза триалкилортоформиатов	146
В.В. Штамбург, А.А. Анищенко, В.Г. Штамбург, А.В. Мазепа Хлорирование продуктов взаимодействия 2-тиенилглиоксаля с амидами карбоновых кислот и аренсульфамидами	149

Наукове видання

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ"**

Збірник наукових праць

Серія

"Нові рішення в сучасних технологіях"

Випуск №33

Науковий редактор чл.-кор. НАН України, проф. Є. І. Сокол

Технічний редактор Т.Л. Коворотний

Відповідальний за випуск канд. техн. наук І. Б. Обухова

Обл.-вид. №106-12

Підписано до друку 09.07.2012. Формат 60х84/16. Надруковано на різнографі

Gestetner 6123CP. Ум.-друк. арк. 9,4. Облік.вид.арк. 10,0.

Наклад 300 прим. 1-й завод 1-100. Зам. №33. Ціна договірна

Видавничий центр НТУ «ХПІ»
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Типографія "Технологічний Центр"
вул. Шатилова дача, 4 м. Харків, 61145