

УДК 621.311:568.264

Маляренко В.А.

## ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМУНАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

*Харківська національна академія міського господарства*

*Загальні відомості.* У житловому господарстві споживається близько 30 % теплової енергії, одержаної від спалювання твердого й газоподібного палива, що добувається в країні. Тому економія теплоти є найважливішим народногосподарським завданням, яке необхідно вирішувати негайно. Важливість цього завдання пояснюється насамперед тим, що сумарна потреба житлових будинків, які експлуатуються, у тепловій енергії протягом одного року складає кількість приблизно в 30 разів більше потреби для нових житлових будинків, що вводяться в експлуатацію. Крім того можливості економії теплоти в будинках, що вже експлуатуються, значно більші, ніж у нових.

Слід ураховувати і те, що в останні роки вартість видобутку й перевезення палива значно збільшилася. Сьогодні існуюча перевитрата теплової енергії в житлових будинках в порівнянні з розрахунковою оцінюється в 25 % і більше. Тому необхідно виявити й реалізувати, в першу чергу, такі енергозберігаючі заходи, які можуть бути здійснені найбільш просто. Зокрема, обов'язковою попередньою умовою проведення теплозберігаючих заходів є приведення у справний стан всіх контрольно-вимірювальних приладів й арматури систем опалення та гарячого водопостачання. Засувки в котельнях і на вводах у будинках, а також прохідні крани на стояках системи опалення повинні бути відрегульовані. Одночасно необхідно виявити й усунути всі несправності зовнішніх огороджуючих конструкцій будинків.

В загальному випадку можливо виділити наступні головні показники, зміна яких (при проведенні певних заходів) дозволить заощаджувати енергію і паливо. В першу чергу, це зниження [1–4]:

- втрат теплоти через зовнішні огороджуючі конструкції будинків (звичайно такі заходи здійснюються при реконструкції або капітальному ремонті житлового будинку);
- кількості зовнішнього повітря, що надходить до приміщення (через нещільності притворів у заповненнях світлових проміжків) до нормальної величини;
- витрати теплової енергії в системі опалення будинку;
- витрати теплової енергії в системі гарячого водопостачання будинку;
- витрати палива в котельнях.

В той же час, незважаючи на визнання енергозбереження одним з головних напрямків розвитку ЖКХ, його практична реалізація гальмується сукупністю наступних проблем:

- недосконалістю нормативно-правової бази, що повинна стимулювати політику енерго- і ресурсозбереження та залучення в цю сферу вітчизняних і іноземних інвестицій;
- нерозвиненістю інвестиційного ринку послуг, у тому числі, установки й обслуговування енергозберігаючого устаткування і техніки;
- монополією енергопостачальних підприємств на усі види діяльності в даному напрямку;
- слабким розвитком маркетингових послуг

- недостатньо обґрунтованими цінами (тарифами) на енергоносії, необхідністю удосконалювання тарифної політики;

- недосконалістю механізму стимулювання і фінансування іноваційних процесів у ЖКХ, зокрема, у напрямку енергозбереження.

Необхідно подальше вдосконалення стандартизації, метрології і сертифікації енерговикористовуючого устаткування будь-якого призначення, теплоізоляційних матеріалів, приладів обліку витрат енергоресурсів та ін. Не менш, а може бути і більш, важливі активна пропаганда і роз'яснення населенню технічних та економічних аспектів реалізації енерго-, ресурсозбереження.

Наведені вище проблеми детально розглянуті в ряді робіт, присвячених реформуванню житлово-комунального господарства України [1–4]. Тому в даній статті, головним чином, зупинимось на питання побутового енергозбереження.

*Економічні джерела світла.* Електричними джерелами світла є лампи розжарювання й газорозрядні (люмінесцентні, низького й високого тиску). Найважливіші характеристики ламп: номінальна напруга, потужність, світловий потік (потужність видимого випромінювання, вимірювана в люменах – лм) і середній термін служби. Економічність лампи оцінюють світловою віддачею – значенням світлового потоку, що припадає на одиницю потужності лампи (лм/Вт). Для ламп накалювання світлова віддача становить 7–19 лм/Вт, для люмінесцентних – 40–80 лм/Вт.

Лампа розжарювання була винайдена А.Н. Лодигінім в 1873 р. Дотепер немає іншого дешевого пристрою з подібним спектром випромінювання. У той же час у них є істотний недолік – дуже низький ККД (у межах 0,05). Великою популярністю користується різновид ламп розжарювання – галогенні лампи, термін служби яких досягає приблизно 2000 годин й які характеризуються високим значенням світловіддачі. Це відбувається за рахунок того, що до складу газового заповнення колби галогенної лампи розжарювання додається йод, який за певних умов забезпечує зворотне перенесення випарених часток вольфраму спіралі зі стінок колби лампи на тіло розжарення.

Газорозрядні лампи відрізняються більш високою світловіддачею, тому що в них електрична енергія перетворюється в енергію оптичного випромінювання за рахунок електричного розряду в газах або парах металів. Газорозрядні лампи працюють зі спеціальними пускорегулюючими апаратами й поділяються на люмінесцентні лампи низького й високого тиску. Люмінесцентні лампи менше витрачають електроенергії, строк їх служби в 5 разів більше в порівнянні з лампами розжарювання.

Однак лампи денного світла не витиснули лампи розжарювання, незважаючи на істотні недоліки останніх. Дискомфорт, що створюється холодним світінням, посилюється стробоскопічним ефектом (мерехтінням ламп). Крім того, пускові пристрої обладнання світильників виробляють шуми різної частоти, які викликають підвищену стомлюваність організму. Дросельна пускорегулююча апаратура забезпечує можливість живлення ламп денного світла від джерел електроструму частотою 50 Гц.

Одним з рішень, що може сприяти усуненню недоліків як ламп розжарювання, так і люмінесцентних, є застосування електронних пускорегулюючих пристроїв (ЕПРП). Це забезпечує роботу ламп денного світла зі світінням частотою 20 кГц, що дозволяє створювати більш енергоекономічні системи внутрішнього освітлення. Одночасне відбувається скорочення витрати електроенергії в результаті значного підвищення напруги живлення люмінесцентних ламп. Так, ЕПРП забезпечують частоту 30–40 кГц, що обумовлює споживання лампою всього 9 Вт електричної потужності замість 60 Вт, потрібних для розвитку рівної по світловіддачі ламп накалювання Термін служби лампи зростає до 8000 годин.

*Енергозбереження в будинках і спорудах.* В останній час різко підвищились витрати на опалення, що приводить до збільшення теплового забруднення навколишнього середовища, атмосфери. Ті, хто заощадив на теплоізоляції будинку, несуть надалі непомірно високі витрати на опалення. Можна навести безліч прикладів, які підтверджують цей факт. Якщо врахувати ситуацію з енергоресурсами й цінами на нафту, то для України вона виявляється дуже складною.

Найбільшими споживачами енергії (близько 30–40 %) є будинки всіх типів. За рівнем споживання енергоресурсів з ними може зрівнятися тільки промисловий сектор. Як свідчать оцінки вітчизняних і закордонних експертів, потенціал економії електроенергії в будинках і спорудах дорівнює 30–40 %, а теплової енергії – близько 50 %.

Нижче наведені типова структура витрати теплової енергії будинком, а також потенціал енергозбереження:

- зовнішні стіни – 30 % (потенціал 50 %);
- вікна – 35 % (потенціал 50 %);
- вентиляція – 15 % (потенціал 50 %);
- гаряча вода – 10 % (потенціал 30 %);
- дах, підлога – 8 % (потенціал 50 %);
- трубопроводи, арматура – 2 % (потенціал 5 %).

Як видно, основне споживання пов'язане з опаленням будинку для компенсації теплових втрат через вікна, стіни, дах, підлогу, за рахунок вентиляції.

Приватні домовласники в Західній Європі використовують майже 30 % всієї отримуваної енергії, що становить майже стільки ж, скільки й промисловість, і більше, ніж весь разом узятий транспорт. Більша частина витраченої енергії (70 %) йде на опалення приміщень (рис. 1). Враховуючи величезну кількість будинків і споруд, необхідно приділяти багато уваги теплоізоляції і енергозбереженню. Наприклад, витрати на опалення 1 м<sup>2</sup> у Німеччині й Україні відносяться як 1:1,75.

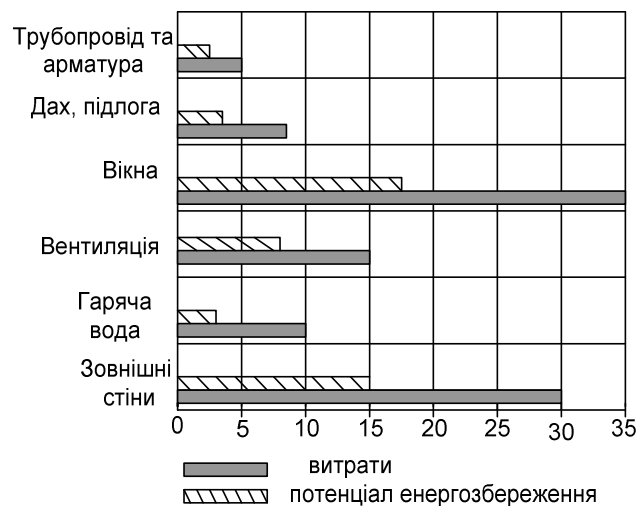


Рисунок 1 – Типова структура витрати теплової енергії будинком і потенціал енергозбереження

Необхідна для здійснення життєвих функцій енергія, її одержання й використання пов'язані з навантаженням на довкілля (збільшується видобуток вугілля, нафти, газу, ядерного палива, емісія продуктів згоряння, теплове забруднення).

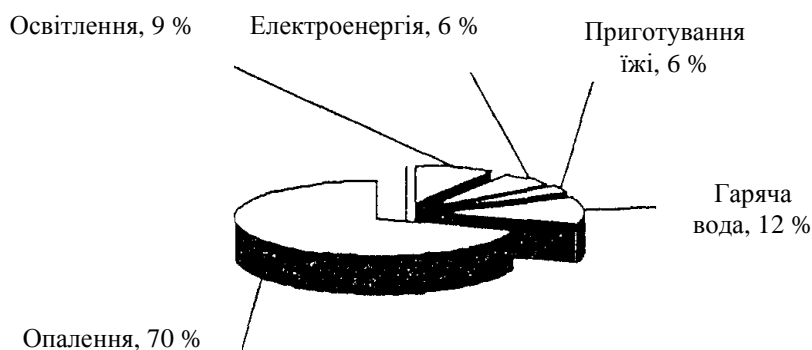


Рисунок 2 – Розподіл енергетичних потреб будинків

Неминучою є поява вуглекислого газу після згоряння вуглеводних носіїв енергії. Піднімаючись в атмосферу, він сприяє виникненню так названого парникового ефекту, що може призвести до катастрофічних наслідків у майбутньому. Ця небезпека повинна бути ліквідована або істотно знижена. Будинки, які тепер будуються або модернізуються, визначають нові межі споживання енергії й теплового тиску на навколишнє середовище, а також ціни на енергію в майбутньому. Як правило, існуюча теплоізоляція будинків не відповідає стандартам.

Енергозберігаючі заходи є важливим засобом скорочення загального енергоспоживання. Незважаючи на зниження світових цін на нафту в 90-ті роки ХХ ст., спостерігається світова тенденція підвищення цін на паливно-енергетичні ресурси. Тому не дивно, що цим питанням приділяється особлива увага, зокрема, в країні ЄС. Так, наприклад, відповідно до німецьких стандартів теплоізоляції, житлове приміщення повинно відповідати наступним параметрам:

- середній коефіцієнт теплопровідності стін – 0,66 Вт/(К);
- норма обміну повітря – 0,8 раз/год;
- ККД приладів опалення – 80 %;
- річна потреба тепла – 26 200 кВт·год;
- річне споживання тепла на 1 м<sup>2</sup> — 140 кВт·год.

При застосуванні сучасної будівельної й теплозахисної технології з'являється можливість утримати річне споживання енергії в межах 30–70 кВт·год/м<sup>2</sup> корисної площі. Це відповідає споживанню 37 л нафти або 3–7 м<sup>3</sup> газу на 1 м<sup>2</sup> житлової площі в рік.

Тим часом, Швеція вже давно має більш жорсткі вимоги з енергозбереження, ніж інші країни Західної Європи. Так, споживання тепла на 1 м<sup>2</sup> житлового простору по нормах там становить 60–70 кВт·год. Як відомо, проходження теплового потоку потужністю 1 Вт крізь елемент будівельної конструкції площею 1 м<sup>2</sup> при різниці внутрішньої й зовнішньої температури в 1 Кельвін характеризує коефіцієнт теплопередачі. Для житлових будинків наведених країн він дорівнює:

- |                                      |       |
|--------------------------------------|-------|
| стеля (12 см ізоляції) –             | 0,35; |
| пінобетон 30–36 см або легка цегла – | 0,66; |
| підлога (5 см теплоізоляції) –       | 0,68; |
| теплоізольовані вікна –              | 0,3.  |
- Річний приплив і втрати енергії звичайного будинку становлять:
- |                            |               |
|----------------------------|---------------|
| приплив сонячної енергії – | 6700 кВт·год; |
| внутрішні джерела тепла –  | 2700 кВт·год, |

вентиляція –	7700 кВт·год;
втрати через вікна –	9000 кВт·год;
втрати через підлогу, підвал –	100 кВт·год ;
втрати через стіни –	6600 кВт·год,
втрати через дах –	4000 кВт·год;
втрати через систему вентиляції –	5200 кВт·год.

У вигляді стандарту можна розглянути будинок з низьким енергоспоживанням (БНЕ), що споживає теплової енергії менше 70 кВт·год/м<sup>2</sup> у рік (від 70 до 30 кВт·год/м<sup>2</sup>). Це відповідає річному споживанню теплової енергії від 300–700 м<sup>3</sup> газу при житловій площі 100 м<sup>2</sup>. БНЕ відрізняється також малим споживанням енергії для забезпечення гарячою водою.

Низьке енергоспоживання таким будинком забезпечують:

- добрі теплоізолюючі властивості будівельних елементів (стін, вікон, даху, підлоги, підвалу);
- сумлінне виконання ізоляції, недопущення тепловтрат, щільна оболонка будівлі (захист від вітру і т.п.);
- пасивне використання сонячної енергії і її акумулювання (добове або сезонне);
- керований повітрообмін (по можливості, повернення тепла);
- добре регульовані опалювальні пристрої;
- енергоекономне забезпечення гарячою водою, в тому числі, за допомогою сонячної енергії в літню пору;
- усунення марних витрат електроенергії.

*Теплова ізоляція трубопроводів, будинків і споруд.* Ізоляційні властивості матеріалу характеризуються значенням теплопровідності, що вимірюється у Вт/(К).

Добрий ізолятор – це матеріал, у якого низьке значення теплопровідності. В ізоляції труб для централізованого теплопостачання широко використовуються пінополіуретани (ППУ), що мають добрі характеристики, зокрема, механічну міцність, гарну термостійкість, можливість наповнення вузьких просторів, низьке водопоглинання. Чудовим ізоляційним матеріалом є поліуретанова піна, застосування якої дозволяє ефективно знизити втрати тепла під час транспортування гарячої води або пари в попередньоізольованих трубах централізованого теплопостачання.

Пінополіуретан містить від 92 до 98 % закритих пор, які заповнені ізоляційними газами. Тільки від 8 до 2 % пінополіуретанів включають твердий полімер. Вміст твердого полімеру визначається щільністю ППУ. Чим вище щільність ППУ, тим вище відсоток твердого полімеру. Закриті пори заповнені газом, що утворюється під час виробництва поліуретанової піни. Існує можливість впливу на структуру пор шляхом використання різних спінюючих агентів. Це впливає на термостійкість піни, тому що структура газу визначає її кінцеву термічну провідність (до 60 %).

Якість теплоізоляції є найважливішим параметром енергоспоживання будинку. Коефіцієнт теплопередачі повинен бути в межах від 0,3 Вт/(м<sup>2</sup>·К) до 0,2 Вт/(м<sup>2</sup>·К), що відповідає збільшенню середньої товщини утеплюючого шару, від 15 до 20 см. Таких значень можна досягнути у різних конструкціях будинків і споруд, використовуючи наступні підходи:

- кладка з утеплюючим шаром 15–20 см і повітряним проміжком під зовнішньої оболонкою;

– подвійна стіна з товщиною утеплюючого шару 15 см з пористого наповнювача;

– одношарова кладка з низькотеплопровідного матеріалу, оштукатурена з двох сторін (наприклад, пресований солом'яний або газобетонний блок мінімальною товщиною 49 см).

Серед теплоізоляторів-наповнювачів існують певні відмінності. Наприклад, широко застосовуваний пінопласт не зовсім безпечний. Перевагу слід віддавати природним, екологічно чистим матеріалам (аглопорит, керамзит, перліт й ін.), які одержують із відходів виробництва при розробці кар'єрів.

Перелік заходів для утеплення огорожуючих конструкцій наведений у табл. 1.

Таблиця 1 – Заходи з утеплення огорожуючих конструкцій

Захід	Витрати, у.о./м <sup>2</sup>	Заощадження, %
Усунення перетічок холодного повітря за рахунок простого утеплення вікон і дверей	мінімальні, <1	10
Потрійне остеклення (скорочує приплив УФ-радіації) або натяжка поліетиленової плівки на рами	3	5–10
Спеціальні штори на вікна	15	15–20
Утеплення горища: додаткова ізоляція товщиною 100–150 мм	20–30	4–7
Утеплення ділянки стіни за радіатором	мінімальні	2–3

*Ізоляційні характеристики заскління й склопакети.* Заповнення віконних прорізів, в ідеалі, повинні мати такі ж характеристики по захисту від шуму, втратам тепла й міцності, як і стінні огорожуючі конструкції, забезпечуючи при цьому необхідну освітленість, комфортне провітрювання, простоту й зручність в експлуатації. Оптимально опір теплопередачі вікон, має бути не нижче показника  $R > 0,6$  (м<sup>2</sup>·К)/Вт ( $R$  – величина, зворотна коефіцієнту теплопередачі).

Це досягається звичайними засобами: установкою рами із двошаровим теплозахисним склом. Теплозахисні вікна мають спеціальний шар, який не видимий оком, але значно зменшує втрати тепла. Цей ефект збільшується при наявності невеликого зазору між першим і другим шаром: у такому випадку витрата тепла зменшується майже у два рази. Вікна в теплозахисному виконанні коштують на 15–

20 % дорожче звичайних, але витрати компенсуються економією на опалення. Віконна рама повинна мати утеплюючий шар як із зовнішньої, так і з внутрішньої сторони. Тепер для заповнення віконних прорізів широко застосовуються склопакети. Склопакет являє собою виріб, що складається з двох або більше шарів скла, з'єднаних між собою по контуру таким чином, що між ними утворюються герметично замкнуті порожнини, заповнені зневодненим повітрям або іншим газом.

Опір теплопередачі одного звичайного скла становить приблизно 0,17 (м<sup>2</sup>·К)/Вт, а склопакета із двох звичайних стекол – 0,36–0,39 (м<sup>2</sup>·К)/Вт. Опір теплопередачі трискляного вікна з урахуванням матеріалу, з якого воно виготовлено, може перевищувати 0,6 (м<sup>2</sup>·К)/Вт.

Найбільший ефект досягається при використанні в склопакеті одного із стекол з селективним покриттям, здатним відбивати теплові хвилі усередину приміщення і одночасно пропускати зовні сонячне теплове випромінювання. Тільки за рахунок застосування у склопакеті такого скла, а також введення в міжскляний простір більш щільного, ніж повітря, газу, наприклад аргону, криптону або ксенону, можна домогтися величини термічного опору, що наближається до одиниці. Дослідження показують, що конструктивні рішення вікон, насамперед їх скляної частини, можуть сприяти досягненню термічного опору теплопередачі, рівному  $1,8-2,0 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)}/\text{Вт}$ .

Традиційна технологія виготовлення склопакетів зводиться до сполучення на певній відстані один від одного двох або трьох стекол. В якості матеріалу, що забезпечує необхідну міжскляну відстань, застосовується алюмінієвий перфорований профіль коробчатого перерізу (середник), усередину якого засипається зернистий осушувач повітря – силікагель. Профіль кріпиться до стекол за допомогою бутилової маси (внутрішній шов), а по торцях утвореного склопакета укладається міцна полісульфідна маса (зовнішній шов). Методи виробництва склопакетів постійно вдосконалюються. Наприклад, відомий метод, коли проміжний простір (середник) заповнюється за допомогою бутилової гумової стрічки, зміцненої металом. Слід зазначити, що матеріал, з якого зроблений середник, впливає на теплоізолюючі властивості країв склопакету (рис. 3).

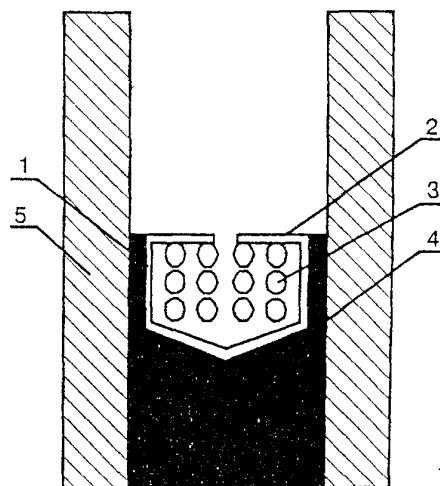


Рисунок 3 – Принципова схема конструкції традиційного ізолюючого склопакету:  
1 – внутрішній шов; 2 – середник; 3 – осушувач; 4 – зовнішній шов; 5 – скло

*Підвищення ефективності систем опалення.* Основною особливістю існуючих систем опалення є те, що вони розраховані на постійну витрату теплоносія. Регулювання надходження теплоносія в нагрівальні прилади споживачів може привести до порушення гідравлічного режиму системи опалення. Для запобігання перегріву приміщень у перехідні періоди опалювального сезону (навесні й восени), а також розрегулювання системи опалення необхідно провести зміни схеми теплового вузла в будинках (у мешканців), перш ніж встановлювати індивідуальні засоби регулювання (автоматичні або ручні)

Розглянемо приклад такої системи опалення, що задовольняє вищенаведеним вимогам (рис. 4).

На тепловому вузлі повинні бути встановлені: запірні арматура (крани, засувки); фільтри механічного очищення; автоматичні регулятори температури води, що подається на кожний фасад будинку, які працюють залежно від температури зовнішнього й внутрішнього повітря. Для цього система повинна бути розділена на дві половини, південну й північну: циркуляційний насос; регулятор витрати (тиску). Труби, засувки та інші елементи повинні бути ізольовані.

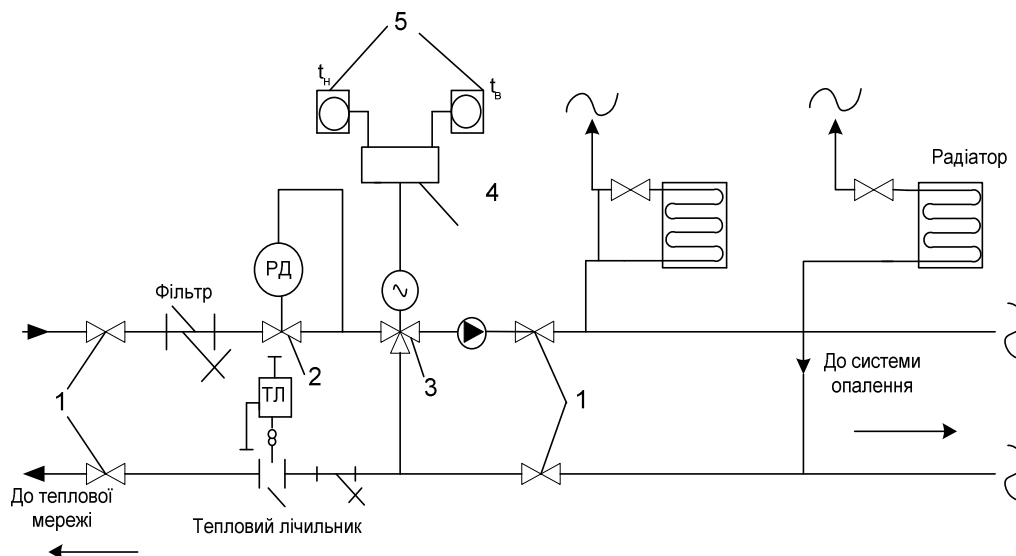


Рисунок 4 – Схема вдосконаленої системи опалення:

- 1 – запірні засувки; 2 – регулятор тиску; 3 – триходовий клапан; 4 – блок керування;  
5 – датчики температури

У будинку на радіаторах встановлюються індивідуальні засоби регулювання (ручні або термостатичні вентилі); лічильники-розподільники тепла, призначені для оцінки індивідуального енергоспоживання.

Заходи для удосконалювання систем опалення представлені в табл. 2. З таблиці видно, що найбільш ефективними є автоматизація теплового вузла й установка ручних регуляторів на кожному опалювальному приладі, які забезпечують найменший строк окупності витрат.

Таблиця 2 – Заходи для вдосконалення систем опалення

Заходи	Витрати, у.о./м <sup>2</sup>	Заощадження, %	Окупність, років
Автоматизація теплового вузла	4000	15–20	1,5
Установка надійних ручних регулювальних кранів на кожному нагрівальному приладі	10	5–7	1,5
Установка автоматичних термостатичних кранів	40	10	9,3

Для забезпечення надійної роботи всі системи повинні проектуватися індивідуально, з попереднім енергетичним обстеженням.



Останнім часом одержали поширення електронні системи регулювання. Типова схема однієї з них наведена на рис. 5.

Основними елементами таких систем є блок регулювання, підмішуючий циркуляційний насос і регулюючий клапан. Вони дозволяють забезпечити добове регулювання подачі теплоносія у двох режимах; недолік – відсутність гнучкості при програмуванні тижневих і річних циклів, а також відсутність захисту від несанкціонованого втручання в роботу.

Одним із зручних, найбільш гнучких за своїми функціями пристроїв, є сімейство регуляторів, що виконані на основі однокристальних мікро ЕВМ. Вони мають програмований календар з можливістю обліку вихідних і святкових днів і гнучке програмування режимів роботи. Змінюючи ступінь закриття клапана, пристрій регулює температуру подаваного в будинок теплоносія. Сталість об'єму циркуляції теплоносія досягається наявністю циркулюючого насоса. Керується і програмується пристрій за допомогою інфрачервоного пульта ручного керування, що забезпечує повний захист від несанкціонованого доступу. Датчики температури, виконані на основі мікросхем, що дозволяє вести опитування їх будь-якої кількості по трипровідній лінії. За допомогою стандартного інтерфейсу можна поєднувати декілька пристроїв у мережу й програмувати їх роботу із центральної ЕОМ. Можливе виконання незалежного регулювання трьох контурів теплопостачання.

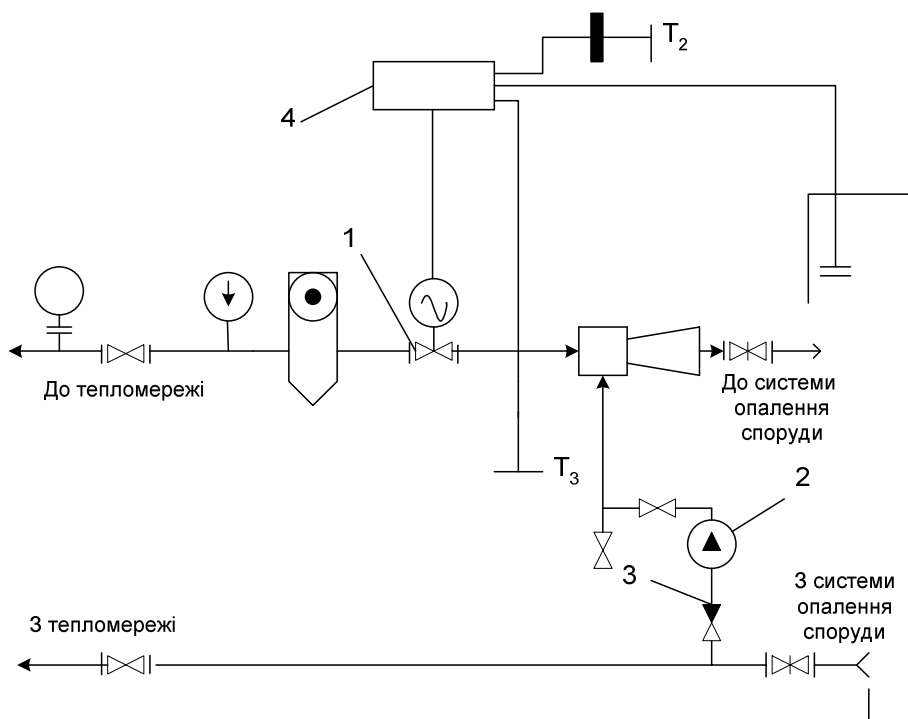


Рисунок 5 – Типова схема електронної системи регулювання теплопостачання:  
1 – засувка; 2 – ЦН; 3 – зворотний клапан; 4 – блок керування

З огляду на те, що значна частина опалювального сезону в Україні має позитивну температуру зовнішнього повітря, можна стверджувати, що автоматичне регулювання витрати теплоносія дозволить заощадити не менше 15 % теплової енергії за опалювальний сезон. Для будинків, які споживають за опалювальний сезон 1000 і більше Гкал теплової енергії, при нинішній вартості енергоресурсів

окупність програмованих пристроїв автоматичного керування теплопостачанням становить 2–3 місяці опалювального сезону.

*Автономні енергоустановки.* Останнім часом широко застосовуються газові опалювальні прилади для квартир, особняків, офісів, магазинів, майстерень, комунальних споруд. Прилади монтують на стіну й підключають до димоходу, завдяки чому відбуває нагрівання води й опалення будинків. Переваги таких приладів – енергоекономічність, рентабельність, рівномірне опалення, чистота й зручність в експлуатації.

Постійна температура води при її нагріванні забезпечується термостатом. Ефективна циркуляція і тиск води за допомогою насоса дають можливість застосовувати труби невеликого діаметра. Теплова енергія спаленого на пальнику газу передається воді, що циркулює від насоса через теплообмінник і через радіатори, підключені до нього, а потім передається повітрю у приміщення.

Становлять інтерес ефективні системи опалення, засновані на опаленні м'яким інфрачервоним випромінюванням, які, на відміну від конвективного способу обігріву, дозволяють знизити на 90 % споживання енергоресурсів. Робота систем заснована на принципі перетворення теплоти згоряння газу в теплові промені без проміжних теплоносіїв (води, пари). Джерелами інфрачервоного випромінювання служать спеціальні тепло-випромінюючі труби, всередині яких циркулюють високотемпературні гази низького тиску.

Враховуючи, що нас чекає різке збільшення вартості палива, в першу чергу, газу, необхідно звернути першочергову увагу на питання диверсифікації та використанні енергоекономічних газогенераторних установок, котлоагрегатів, які призначені для теплопостачання будинків і споруд, одержання гарячої води й пари в різних технологічних процесах і для побутових потреб. Основним паливом для них можуть служити відходи деревообробки, дріб'язок торф'яних брикетів, тріска, кора, лігнін та інші тверді горючі матеріали. Перевагою вищевказаних агрегатів є їх високий ККД, низька вартість, простота конструкцій і обслуговування, а також можливість використання дешевих місцевих видів палива й відходів промисловості.

*Ефективне використання електропобутових приладів.* Не маючи лічильника, не можна судити, наскільки ефективні заходи щодо зниження енергоспоживання. Сам по собі лічильник не знижує споживання, але дає стимул до заощадження енергії. За рахунок установки лічильника, а також правильних розрахунків з постачальником енергії знижується сума оплати за теплову енергію на 20–30 %.

У даний час одержали поширення прилади для обліку витрати рідини, газу й тепла. Через особливу актуальність побутового енергозбереження й пов'язаного з ним обліку енергоресурсів розпочато їх виробництво.

Для обліку витрати води застосовують крильчасті й турбінні водолічильники. Для обліку витрати газу в квартирах і на дачах застосовують побутові лічильники ротаційного типу, які забезпечують надійну роботу при пульсуючих тисках газу. В системах опалення і гарячого водопостачання використовують теплолічильники, у комплект яких входять витратомір, термопари й процесор. Діапазон вимірювання температур теплоносія – 50–180 °С, діапазон виміру витрати теплоносія – 0,2–120 м<sup>3</sup>/год, діаметр умовного проходу труби – 20–80 мм.

*Ефективне використання електропобутових приладів.* Істотно скоротити споживання електроенергії дозволяє вибір і використання найбільш економічних електроприладів.

Самим энергоемным споживачем електроенергії є електроплити. Річне споживання електроенергії однією електроплитою становить 1200–1400 кВт·год. В той же час їх застосування замість газових плит і плит на твердому паливі істотно поліпшує санітарно-гігієнічні умови на кухні й у будинку (відсутність чадного газу). Для економії енергії необхідна своєчасна заміна несправних конфорок, для поліпшення теплопередачі – щільний контакт використовуваних для нагрівання поверхонь, застосування спеціального посуду та інші заходи.

Збільшення споживання електроенергії пов'язано також з широким використанням побутової електротехніки, вибору і експлуатації якої потрібно приділяти постійну увагу. Так, компресорний холодильник залежно від об'єму споживає 250–450 кВт·год, абсорбційний – 500–1400 кВт·год у рік. Економічність їх використання залежить від режиму роботи й дотримання правил експлуатації. Побутові холодильники розраховані на роботу в сухому, опалювальному приміщенні при температурі навколишнього повітря 16–32 °С. Серед пральних машин найбільш енергоекономічними є автоматичні з програмним управлінням.

Відзначимо ще деякі побутові електроприбори, використання яких пов'язано збільшенням споживання електроенергії: пилососи, побутові кондиціонери, радіотелевізійна апаратура, праски з автоматичним регулюванням. Зокрема, для останніх встановлено, що оптимальна температура прасування для виробів зі штучного шовку складає 85–115 °С, вовни – 140–165, натурального шовку – 115–140, бавовняної тканини – 165–190, лляної – 190–230 °С. Використання цих даних дозволяє підвищити продуктивність праці на 40–60 %, а витрата електроенергії знизити на 20–25 %.

#### Література

1. Малярєнко В.А. Концептуальные положения развития муниципальной энергетики Украины//Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. Сб. Вып.25.– К.: Техника, 2000. – С. 208–216.
2. Малярєнко В.А., Шутєнко Л.М. Энергозбереження в житлово-комунальному господарстві. Частина I. // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2005 – №6 – С. 25–33; Частина II. // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2005 - №7 – С. 2–9.
3. Малярєнко В.А. Основы теплофизики будівель та енергозбереження – Х.: «Видавництво САГА», 2006. – 484 с.
4. Малярєнко В.А. Энергосбережение и централизованное теплоснабжение в концепции развития коммунальной энергетики. // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2007 - №3 – С. 72–77.

#### Bibliography (transliterated)

1. Malyarenko V.A. Kontseptualnyie polozheniya razvitiya munitsipalnoy energetiki Ukrainyi Kommunalnoe hozyaystvo gorodov: Nauch.-tehn. Sb. Vyip.25.– K.: Tehnika, 2000. – p. 208–216.
2. Malyarenko V.A., Shutenko L.M. Energozberzhennya v zhitlovo-komunalnomu gospodarstvI. Chastina I. Energosberzhenie. Energetika. Energoaudit. 2005 – #6 – p. 25–33; Chastina II. Energosberzhenie. Energetika. Energoaudit. 2005 #7 – p. 2–9.
3. Malyarenko V.A. Osnovi teplofiziki budIvel ta energozberzhennya – H.: «Vidavnitstvo SAGA», 2006. – 484 p.

4. Malyarenko V.A. Energoberezhnie i tsentralizovannoe teplosnabzhenie v kontseptsii razvitiya kommunalnoy energetiki. Energoberezhnie. Energetika. Energoaudit. 2007 #3 – p. 72–77.

УДК 621.311:568.264

Маляренко В.А.

### **ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОММУНАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

Рассмотрены основные направления и конкретные мероприятия сокращения расхода тепловой и электрической энергии, воды, газа, и других ресурсов в жилищно-коммунальном хозяйстве

УДК 661.63:662.6

Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М., Болдырев С.А.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ПОТЕНЦИАЛА  
В ЭКСТРАКЦИОННОМ ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА  
ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ**

*АО «Содружество-Т», Харьков*

**Введение**

Вряд ли человечество когда-нибудь в будущем вернется в "идиллию экологического равновесия", существовавшую до Неолитической революции, когда оно было интегрировано в естественные биосферные циклы. Переход к производящей экономике нарушил эту интеграцию, и численность человечества начала расти в соответствии с потенциалом цивилизации. Основным ресурсом, обеспечивающим условия существования и развития современной цивилизации, стала энергия, с помощью которой обеспечивается как производство продуктов питания, так и удовлетворяются другие потребности человека.

К началу XX века экстенсивное использование сельскохозяйственных земель позволяло обеспечивать продуктами питания около 1 млрд. жителей планеты. В настоящее время численность населения Земли увеличилась более, чем в 6 раз, и обеспечение питанием людей сейчас и в будущем невысказимо без интенсивного возделывания сельскохозяйственных земель, что предполагает использование минеральных удобрений, обеспечивающих высокое и устойчивое плодородие почвы. К основным элементам, обеспечивающим жизнедеятельность растений, относится фосфор.

Для производства простых и сложных фосфорсодержащих удобрений используется фосфорная кислота, значение которой также велико в полупроводниковой электронике, медицине, оптике и других отраслях промышленности, но основное крупнотоннажное ее производство направлено на удовлетворение потребностей сельского хозяйства.

В работе Беглова Б.М. и Жекеева М.И. [1] показано, что в настоящее время экономически наиболее выгоден экстракционный способ получения фосфорной кислоты. Это связано с меньшим его удельным энергопотреблением по сравнению с термическим способом и простой возможностью экстракционной очистки конечного продукта.

Уменьшение удельного энергопотребления при производстве фосфорной кислоты, впрочем, как и других продуктов, оказывает положительное влияние не только на конкурентоспособность производителя, но и на окружающую среду вследствие уменьшения как выбросов вредных веществ, так и эмиссии парниковых газов.

Поэтому в данной работе определяется энергосберегающий потенциал на работающем предприятии в экономически наиболее выгодном процессе производства фосфорной кислоты – экстракционном процессе.

**Анализ технологического процесса**

На рассматриваемом предприятии производство экстракционной фосфорной кислоты осуществляется в дигидратном процессе, технологическая схема которого включает две основные стадии. На первой стадии проводится экстракция фосфорной кислоты из подготовленного фосфатного сырья с помощью концентрированной серной ки-

слоты при циркуляции обратной фосфорной кислоты, охлаждение образовавшейся пульпы и ее фильтрация.

На второй стадии производства осуществляется концентрирование экстрагированной фосфорной кислоты. Концентрирование осуществляется выпариванием в однокорпусной вакуум-выпарной установке.

Наибольшее потребление тепловой энергии происходит на стадии концентрирования, а на стадии экстрагирования наоборот тепловая энергия выделяется, но в настоящее время провести тепловую интеграцию всего процесса на обследуемом предприятии невозможно по технологическим ограничениям, поэтому в дальнейшем рассматривается только выпарное отделение (рис. 1).

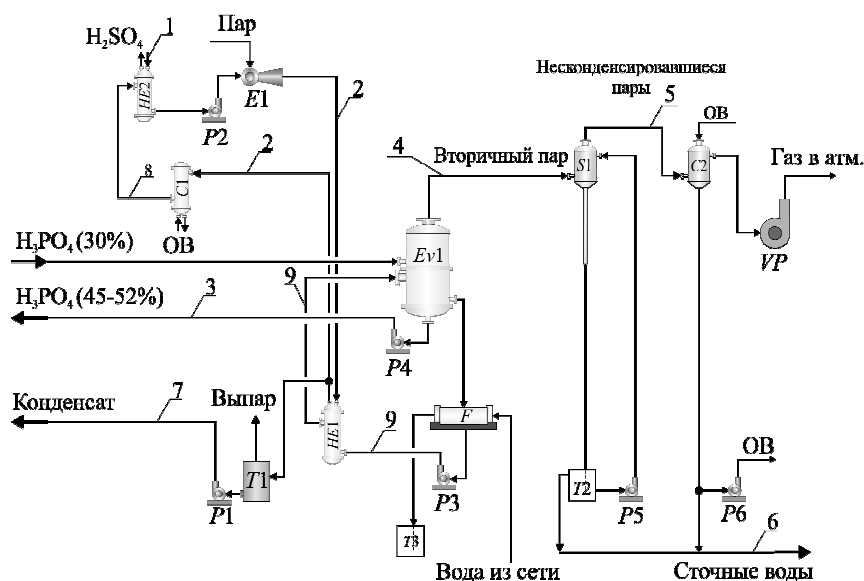


Рисунок 1 – Принципиальная технологическая схема установки концентрации фосфорной кислоты:  $P1-P6$  – насосы,  $T1-T3$  – емкости,  $C1, C2$  – конденсаторы,  $Ev1$  – выпарка,  $E1$  – парозежектор,  $VP$  – вакуумный насос,  $F$  – фильтр,  $HE$  – теплообменники

Фосфорная кислота с концентрацией 30 % подается в выпарной аппарат  $Ev1$ . Из нижней части выпарного аппарата отбирается циркуляционный поток концентрированной кислоты и подается на фильтрацию ( $F$ ). Отфильтрованная кислота прокачивается насосом  $P3$  через теплообменник ( $HE1$ ), где нагревается паром, и затем возвращается обратно в выпарной аппарат. Из нижней части выпарного аппарата отводится также фосфорная кислота концентрацией 45–52 %, которая поступает в емкость готовой кислоты. В теплообменнике  $HE1$  пар, нагревающий кислоту, конденсируется и отводится по двум линиям. Первый поток направляется в сборник конденсата  $T1$  и затем отводится с установки. Второй поток конденсата охлаждается в водяном холодильнике  $C1$  и направляется в теплообменник  $HE2$  для охлаждения серной кислоты. Конденсат в теплообменнике  $HE2$  нагревается потоком горячей серной кислоты и насосом  $P2$  подается в эжектор  $E1$ . В эжекторе конденсат смешивается с острым паром, испаряется и поступает в теплообменник  $HE1$ .

Пары из испарителя  $Ev1$  поступают в скруббер  $S1$ , где происходит конденсация фтор содержащих соединений, для этого в скруббер подают промывную воду. Сконденсированные пары и вода собираются в барометрической емкости, откуда вода возвращается насосом  $P5$  в скруббер, а балансовое количество отводится на очистные сооружения. Пары и газы из скруббера поступают в конденсатор, где конденсируются

охлаждающей водой. Конденсат отводится в канализацию. Неконденсируемые пары и газы отсасываются вакуум насосом и выбрасываются в атмосферу.

С помощью изучения технологического регламента процесса получения экстракционной фосфорной кислоты, технологических схем, прилагаемых к регламенту и работы с персоналом, обслуживающим процесс, определены основные технологические потоки данного процесса и их характеристики.

Поток 1. Исходная фосфорная кислота 30 %. Поступает в выпарной аппарат с параметрами  $G = 25,6$  т/ч,  $t = 40$  °С.

Поток 2. Серная кислота. Поступает в теплообменник HE2, охлаждается и подается на стадию экстракции.  $G = 44$  т/ч,  $t_{нач} = 94$  °С,  $t_{кон} = 45$  °С.

Поток 3. Пар (конденсат пара). Поступает в теплообменник HE1 и конденсируется, часть конденсата выводится с установки с параметрами  $G = 15,44$  т/ч,  $t = 150$  °С.

Поток 4. Конденсат. Часть потока после HE1 охлаждается в водяном холодильнике, затем нагревается в теплообменнике HE2 и подается в эжектор с параметрами  $G = 15,95$  т/ч,  $t_1 = 150$  °С,  $t_2 = 35$  °С,  $t_3 = 83$  °С.

Поток 5. Циркуляция выпарного аппарата. Отбирается из выпарного аппарата, фильтруется, подогревается в теплообменнике и возвращается в выпарной аппарат с параметрами  $G = 2040$  т/ч,  $t_{нач} = 72$  °С,  $t_{кон} = 78$  °С.

Поток 6. Фосфорная кислота (45–2 %). Поступает из выпарного аппарата в емкость готовой продукции с параметрами  $G = 14,45$  т/ч,  $t = 73$  °С.

Поток 7. Пары выпарного аппарата. Поступают из выпарного аппарата в скруббер с параметрами  $G = 11,15$  т/ч,  $t_{нач} = 72$  °С,  $t_{кон} = 45$  °С.

Поток 8. Пары скруббера. Поступают из скруббера в конденсатор смешения, где конденсируются охлаждающей водой с параметрами  $G = 8,8$  т/ч,  $t_{нач} = 45$  °С,  $t_{кон} = 38$  °С.

Поток 9. Сточные воды. Сконденсировавшиеся пары и газы из скруббера и конденсатора смешения отводятся в канализацию с параметрами  $G = 10,35$  т/ч,  $t_{нач} = 40$  °С,  $t_{кон} = 25$  °С.

Поток 10. Промывка фильтра. Сетевая вода поступает на промывку фильтра фосфорной кислоты и отводится в емкость промывной воды.

Поток 11. Охлаждающая вода. Поступает для охлаждения в кожухотрубчатый холодильник и в конденсатор смешения и отводится на градирню с температурами  $t_{нач} = 25$  °С,  $t_{кон} = 40$  °С.

Поток 12. Неконденсируемые пары и газы. Отбираются вакуум насосом и выбрасываются в атмосферу.  $t = 38$  °С.

Далее для вычисления технологических потоковых данных был составлен материальный баланс установки концентрирования фосфорной кислоты, включая материальный баланс выпарной установки (Таблица 1).

Таблица 1 – Материальный баланс установки концентрирования фосфорной кислоты

Приход, т/ч		Расход, т/ч	
Фосфорная кислоты (30%)	25,60	Фосфорная кислота (45/52%)	14,45
Пар	15,58	Конденсат	15,58
Серная кислота	44,00	Вода	10,35
		Серная кислота	44,00
		Неконденсируемые газы	0,80
<b>Итого</b>	<b>85,18</b>	<b>Итого</b>	<b>85,18</b>

## Сбор данных для интеграции

Для анализа энергопотребления и структуры теплообменной сети необходимо выделить технологические потоки, участвующие в теплообмене, а также потоки, которые могут быть включены в тепловую интеграцию. Из описанных нами выше потоков следующие потоки, участвующие в теплообмене, могут быть включены в анализ и тепловую интеграцию:

- серная кислота;
- конденсат;
- пары выпарного аппарата;
- пары из скруббера;
- циркуляционная фосфорная кислота.

Помимо этого в тепловую интеграцию может быть включен поток конденсата, уходящий с установки с температурой 150 °С. Энергетический потенциал этого потока можно использовать для нагрева холодных потоков, охлаждая его до 35 °С. Поток фосфорной кислоты, покидающий установку при температуре 73 °С, также может быть включен в тепловую интеграцию, поскольку согласно с технологией производства экстракционной фосфорной кислоты поток необходимо охлаждать до 25 °С. Сточные воды, как и предыдущие 2 потока, не участвуют в теплообмене и отводятся с установки при температуре 40 °С с расходом 10,35 т/ч. Этот поток также можно охлаждать до 25 °С и выводить с установки.

Итак, мы определили 9 технологических потоков, которые могут быть включены в тепловую интеграцию на установке концентрирования фосфорной кислоты. Популяция этих потоков приведена на рисунке 2 в температурных интервалах с указанием тепловых нагрузок, что позволяет сделать простой анализ возможных структур рекуперативного теплообмена между технологическими потоками рассматриваемого процесса, что облегчает дальнейший синтез оптимальной теплообменной системы [2].

Используя результаты изучения технологической схемы, регламента и материальный баланс установки, составим таблицу потоковых данных, необходимых для определения тепловой мощности потребляемой установкой концентрирования фосфорной кислоты в настоящее время (Таблица 2).

В итоге, в нашем распоряжении имеется 7 горячих технологических потоков и 2 холодных потока с определенными потоковыми данными [2].

Для дальнейшего анализа нам необходимо определить величину мощности рекуперации в существующем процессе.

В настоящее время технологическая схема процесса включает только один теплообменный аппарат, участвующий в рекуперации тепловой энергии, это теплообменник *HE2* (рис. 1).

Для определения теплоты рекуперации необходимо вычислить температуру серной кислоты после растворения в ней воды. Исходя из полученных данных, количество воды для получения 98 % кислоты равняется 880 кг. Теплота растворения 880 кг воды в серной кислоте будет составлять ~ 897 кДж [3], что позволяет определить температуру серной кислоты на входе в рекуперативный теплообменник *HE2* (Таблица 2), и соответственно мощность рекуперации тепловой энергии в рассматриваемом процессе, которая составляет величину ~ 900 кВт.



Таблица 2 – Система потоков для анализа энергопотребления установки концентрирования фосфорной кислоты

№	Stream name	Тип	$t_s, °C$	$t_T, °C$	$G, т/ч$	$C, кДж/кг·K$	$r, кДж/кг$	$CP, кВт/К$	$\Delta H, кВт$
1	Серная кислота	гор	94	45	44,09	1,5		18,34	900,01
2	Конденсат 1	гор	150	35	15,95	4,19		18,56	2134,60
3	Фосфорная кислота (45/52%)	гор	73	25	14,45	2,30		9,23	443,13
4	Пар 1 (после Ev1)	гор	72	45	11,15	1,96		6,07	163,91
	Конденсат пара 1	гор	45	45	2,35		2394		1562,80
5	Пор 2	гор	45	38	8,80	1,94		4,73	33,11
	Конденсат пара 2	гор	38	38	8,00		2411		5357,80
6	Сточные воды	гор	40	25	10,35	4,19		12,05	180,69
7	Конденсат 3	гор	150	35	15,58	4,19		18,13	2085,30
8	Конденсат 2	хол	35	150	15,95	4,19		18,56	2134,6
9	Фосфорная кислота (циркуляция)	хол	72	78	2040,00	2,30		1303,33	7820,00

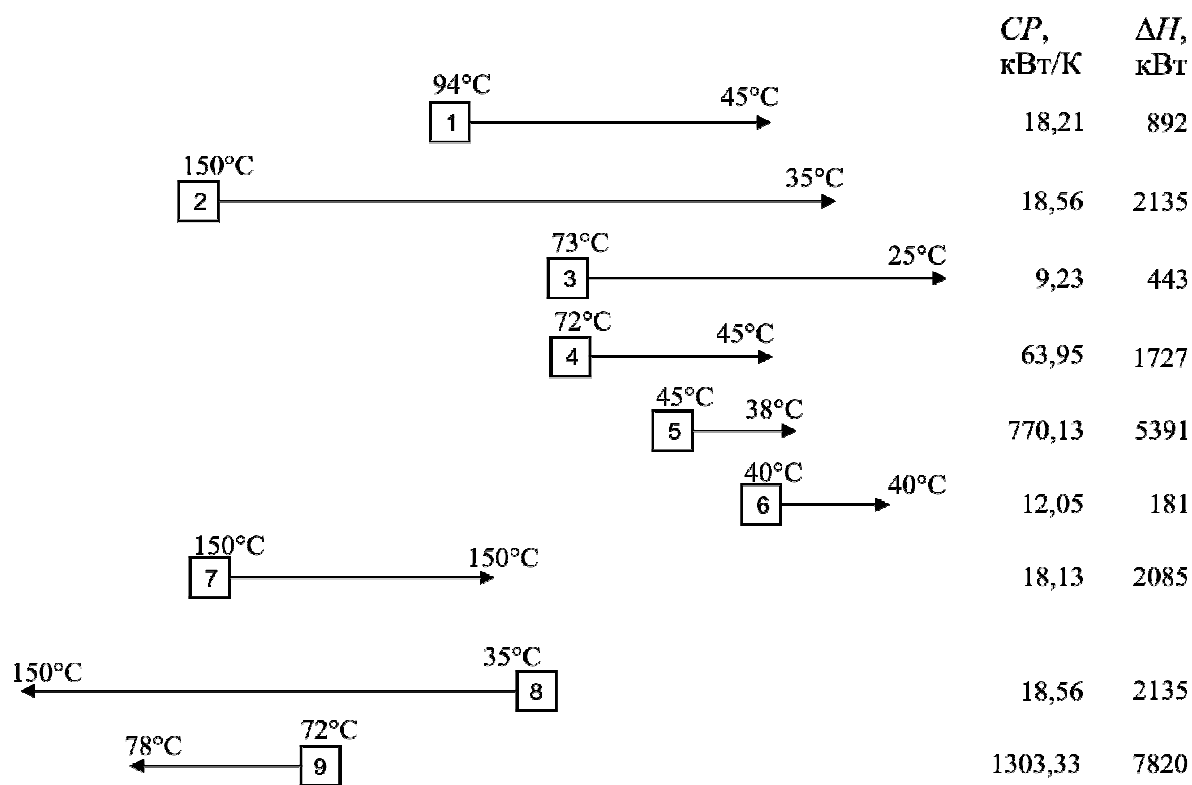


Рисунок 2 – Популяция технологических потоков установки концентрации фосфорной кислоты. Справа указаны потоковые теплоемкости (водные эквиваленты) и тепловые нагрузки для каждого потока

Определение энергосберегающего потенциала

Используя данные технологических потоков из таблицы 2, построим составные кривые для существующего процесса концентрирования фосфорной кислоты (рис. 3).

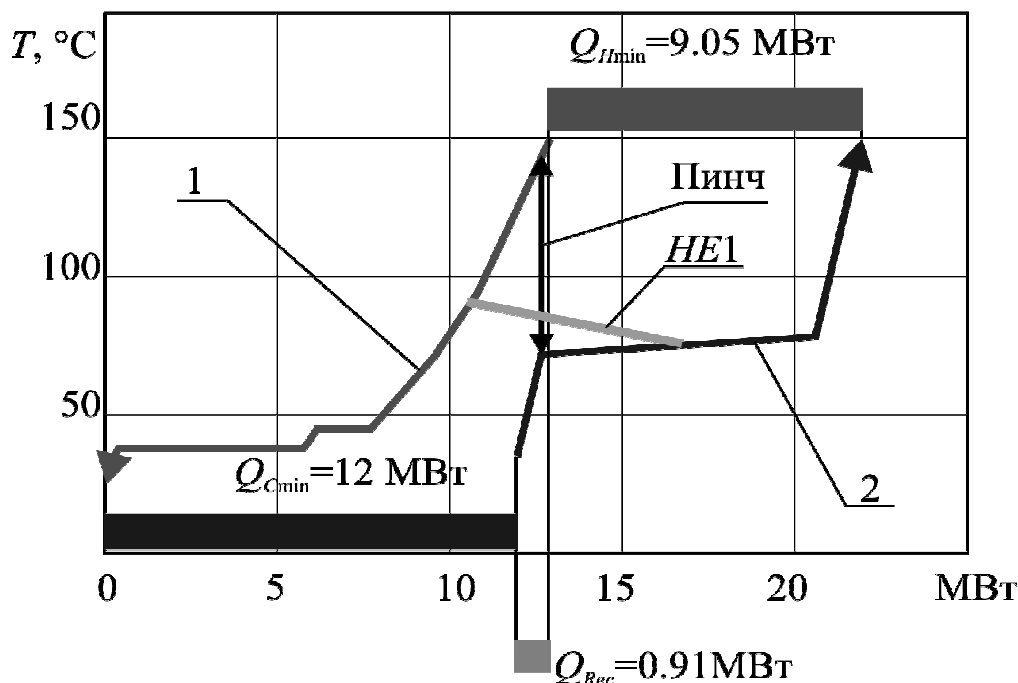


Рисунок 3 – Составные кривые процесса концентрации фосфорной кислоты с существующей в настоящее время системой рекуперации тепловой энергии  
 $Q_{Hmin}$  – горячие утилиты,  $Q_{Cmin}$  – холодные утилиты,  $Q_{Rec}$  – мощность рекуперации тепловой энергии, HE1 – рекуперативный теплообменник  
 1 – горячая составная кривая, 2 – холодная составная кривая

Составные кривые дают нам полную энергетическую характеристику существующего процесса концентрирования фосфорной кислоты. Тепловая мощность, необходимая для нагрева всех холодных потоков – проекция холодной составной кривой на ось абсцисс, на которой откладывается потоковое теплосодержание, составляет 9,954 МВт, а мощность, необходимая для охлаждения горячих потоков ~ 12,9 МВт – проекция на ось абсцисс горячей составной кривой.

Если составные кривые расположить так, чтобы область их перекрытия на оси абсцисс была равна значению мощности рекуперации тепловой энергии в изучаемом процессе, то расстояние по оси абсцисс между правыми концами горячей и холодной составными кривыми покажет тепловую мощность, потребляемую процессом концентрирования в настоящее время, т.е. значение горячих утилит. Аналогично расстояние между левыми концами составных кривых даст значения холодных утилит.

Горячие утилиты составляют величину порядка 9 МВт, а холодные утилиты – 12 МВт. Горячей утилитой для данного процесса является пар, подаваемый в эжектор, а холодная утилита – охлаждающая вода оборотного цикла. Рекуперация составляет величину около 1 МВт.  $\Delta T_{min}$  по составными кривым в существующей системе теплообмена равняется 72 °С, хотя на рекуперативном теплообменнике  $\Delta T_{min}$  составляет 11 °С, что говорит о большом невертикальном теплообмене и завышенной его поверхности [2]. И, по-

сколько пинч локализуется на температурах  $TPC = 72\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $TPH = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 3), то рекуперативный теплообменный аппарат *HE2* переносит тепловую энергию через пинч. Удивительно, но в существующем в настоящее время технологическом процессе концентрирования фосфорной кислоты в рекуперации тепловой энергии участвует один теплообменный аппарат, и именно он опосредовано передает тепловую энергию от горячих утилит к холодным, увеличивая потребление как первых, так и вторых, т.е. увеличивая стоимость эксплуатации установки. Расположение этого теплообменника показано на рисунке 3.

Если расположить на рисунке 2 теплообменное оборудование, показанное на существующей технологической схеме, указать тепловую нагрузку теплообменного оборудования, отложить пинч-температуры в соответствии с составными кривыми, то мы получим сеточную диаграмму системы теплообмена установки концентрирования фосфорной кислоты. Сеточная диаграмма теплообменной системы существующего процесса концентрирования фосфорной кислоты представлена на рисунке 4.

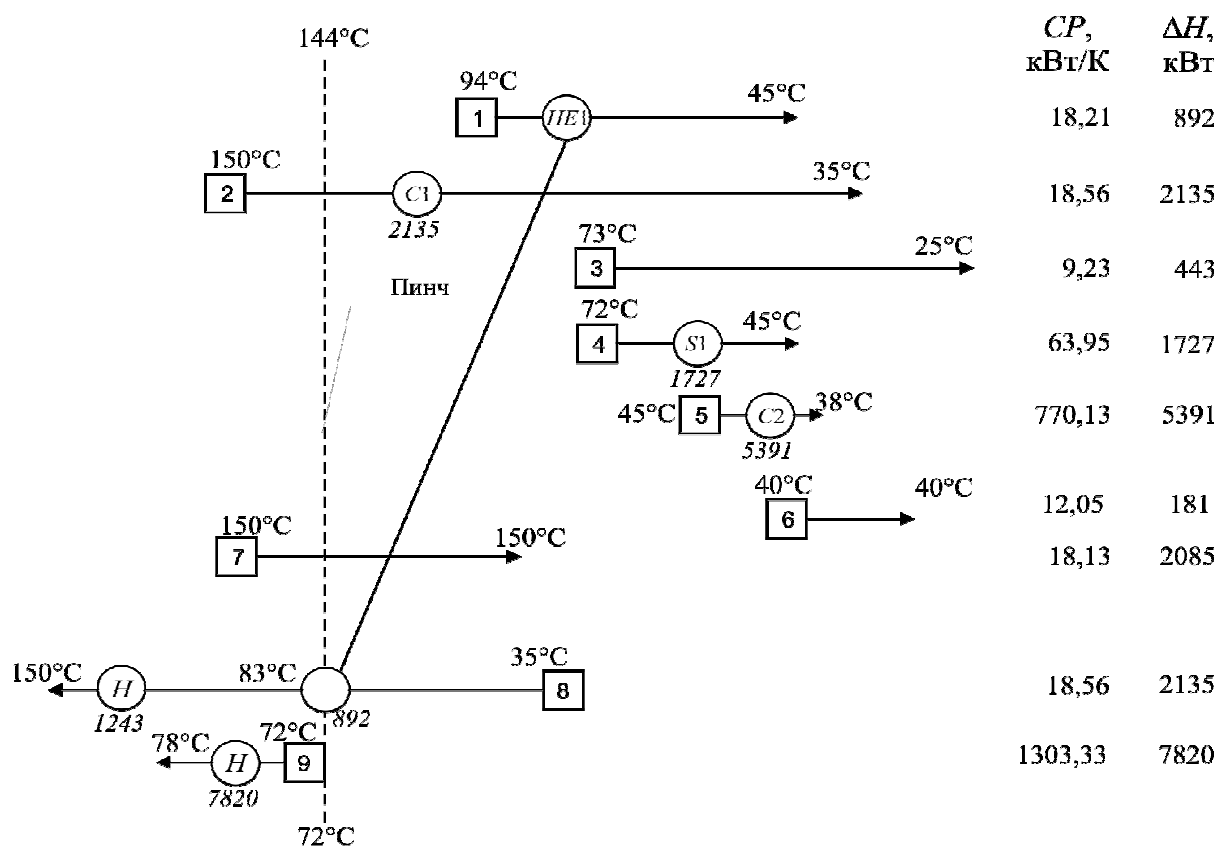


Рисунок 4 – Сеточная диаграмма существующей теплоэнергетической системы установки концентрирования фосфорной кислоты: *C* – холодная утилита (конденсатор), *H* – горячая утилита, *HE* – теплообменный аппарат, *S* – скруббер  
Под обозначением оборудования показана его тепловая нагрузка

На рисунке 2 наглядно показан рекуперативный теплообменник *HE1*, расположенный поперек пинча. Это означает, что энергия опосредовано переносится от горячих утилит к холодным [2]. При проектировании оптимальной тепловой схемы данного производства этот теплообменник должен быть инсталлирован в соответствии с пинч-принципами проектирования теплообменных систем [2]. На потоке 2 используются холодные утилиты выше точки пинча, что приводит к увеличению энергопотребления и

также противоречит пинч-принципам проектирования. Потoki 3, 6 и 7 не участвуют в тепловой интеграции, хотя имеют энергетический потенциал, который может быть использован при проектировании новой системы теплообмена для процесса концентрации фосфорной кислоты.

Для определения возможного потенциала энергосбережения построим составные кривые для процесса концентрирования фосфорной кислоты с  $\Delta T_{\min}$ , для теплообменной сети, равной  $5^\circ\text{C}$ , что вполне достижимо на современных высокоэффективных компактных теплообменных аппаратах [5].

На рисунке 5 показаны составные кривые для интегрированного процесса. Мощность рекуперации тепловой энергии увеличивается до 3,14 МВт. Горячие утилиты уменьшаются до 6,8 МВт, а холодные до 8,87 МВт. Это означает, что энергосберегающий потенциал по горячим утилитам равен 2,2 МВт, а по холодным – 3,14 МВт. Разница в указанных значениях появляется вследствие того, что при уменьшении горячих утилит уменьшается количество потребляемого пара, и, следовательно, снижение холодных утилит происходит как за счет увеличения рекуперации, так и за счет уменьшения длины горячей составной кривой.

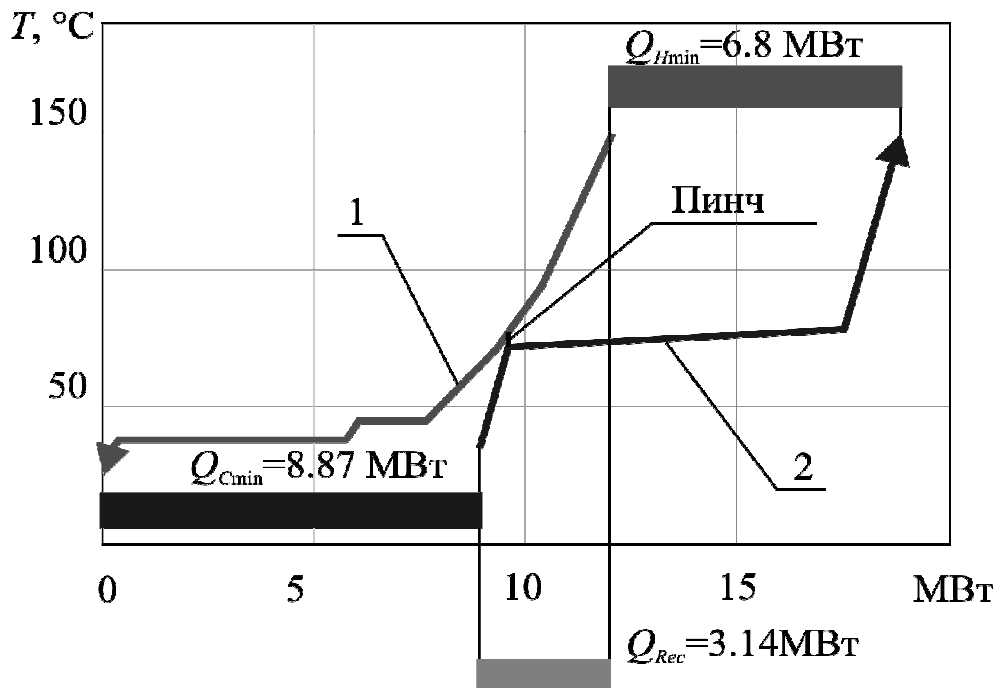


Рисунок 5 – Составные кривые процесса концентрации фосфорной кислоты с возможной его тепловой интеграцией

$Q_{H\min}$  – горячие утилиты,  $Q_{C\min}$  – холодные утилиты,  
 $Q_{Rec}$  – мощность рекуперации тепловой энергии  
 1, 2 – горячая и холодная составные кривые

Стоимость горячих утилит для анализируемого предприятия составляет 150 долл. США/кВт·год, а холодных утилит – 15 долл. США/кВт·год. Это позволяет выразить энергосберегающий потенциал процесса концентрации фосфорной кислоты в деньгах, что составляет сумму в 376 500 долл. США. В таблице 3 представлены результаты возможной экономии энергии при уменьшении  $\Delta T_{\min}$  в системе теплообмена исследуемого предприятия.

Таблица 3 – Возможная экономия энергии при улучшении тепловой интеграции в процессе концентрирования фосфорной кислоты

	$\Delta T_{\min}$	Горячие утилиты, МВт	Холодные утилиты, МВт	Рекуперация, МВт	Затраты на энергию, долл. США/год
Существующий процесс	72	9,0	12,0	0,91	1 530 000
Интегрированный процесс	5	6,8	8,9	3,14	1 135 500
Экономия		2,2	3,1		376 500

### Заключение

В результате обследования промышленного процесса концентрирования фосфорной кислоты было определено энергопотребление процесса и распределение нагрузки между горячими и холодными утилитами, а также  $\Delta T_{\min}$  в системе теплообмена. Выявлены недостатки существующей теплообменной системы, которые приводят к увеличению энергопотребления. Показано, что экономический потенциал энергосбережения, доступный интеграции процессов, равен 376500 долл. США, что составляет ~ 25% стоимости энергии, потребляемой в процессе в настоящее время.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Европейского сообщества в рамках проекта ЕСОРНОS, контракт No INCO-СТ-2005-013359.

### Литература

1. Беглов Б.М., Жекеев М.К. Перспективы производства фосфора, удобрений и солей различного назначения на основе экстракционной фосфорной кислоты // Химическая промышленность. 2002. – № 4. – С. 1–3.
2. Смит Р., Клемеш Й., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М. Основы интеграции тепловых процессов. – Харьков: ХГПУ. 2000. – 457 с.
3. Амелин А.Г. Технология серной кислоты. – М.: Химия, 1971.– 496 с.
4. Технология фосфорных и комплексных удобрений./ Под ред. С.Д. Эвенчика и А.А. Бродского.– М.: Химия, 1987. – 464 с.
5. Пластинчатые теплообменники в промышленности / Л.Л. Товажнянский, П.А. Капустенко, Г.Л. Хавин, О.П. Арсеньева. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2004.– 232 с.

### Bibliography (transliterated)

1. Beglov B.M., Zhekeev M.K. Perspektiviyi proizvodstva fosfora, udobreniy i soley razlichnogo naznacheniya na osnove ekstraktsionnoy fosfornoj kislotyi Himicheskaya promyishlennost. 2002. – # 4. – p. 1–3.
2. Smit R., Klemesh Y., Tovazhnyanskiy L.L., Kapustenko P.A., Ulev L.M. Osnoviyi integratsii teplovyih protsessov. – Harkov: HGPU. 2000. – 457 p.
3. Amelin A.G. Tehnologiya sernoy kislotyi. – M.: Himiya, 1971.– 496 p.
4. Tehnologiya fosfornyih i kompleksnyih udobreniy.Pod red. S.D. Evenchika i A.A. Brodskogo.– M.: Himiya, 1987. – 464 p.
5. Plastinchatyie teploobmenniki v promyishlennosti L.L. Tovazhnyanskiy,

P.A. Kapustenko, G.L. Havin, O.P. Arseneva. – Harkov: NTU «NPI», 2004.– 232 p.

УДК 661.63:662.6

Товажнянський Л.Л., Капустенко П.О., Ульянов Л.М., Болдирев С.О.

**ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО ПОТЕНЦІАЛУ  
В ЕКСТРАКЦІЙНОМУ ПРОЦЕСІ ВИГОТОВЛЕННЯ ФОСФОРНОЇ КИСЛОТИ**

У роботі показано, що економічний потенціал енергозбереження, доступний інтеграції процесів обстеженого процесу екстракційного виготовлення фосфорної кислоти, дорівнює 376500 дол. США, що становить 25 % вартості енергії, споживаної в процесі у теперішній час.

УДК 621.577:621.564

Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Хавин Г.Л.

### ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ХЛАДАГЕНТА $CO_2$ (R744) В ТЕПЛОВЫХ НАСОСАХ

Исторически традиционные хладагенты – фреоны. Они изначально использовались в тепловых насосах и в большинстве промышленно развитых стран либо уже запрещены (группа CFC), либо для них установлены сроки ограниченного использования (группа HCFC). Фактически введено временное разрешение на использование гидрофторуглеродов (группа HCFC), которое определено сроком до 2020 г., а в ряде стран внутренними нормативами намечается более ранний запрет. В настоящее время на производство, использование и торговлю хлорфторуглеродами действует ограничение, определенное «Монреальским протоколом по озоноразрушающим веществам» (1987 г.). В 1996 г. было прекращено производство фреонов группы CFC, а для хладагентов группы HCFC установили постепенное сокращение: до 2003 г. уменьшить на 35 %, до 2010 – на 65 %, до 2015 – на 90 %. Для развивающихся стран этот срок продлен до 2040 г. [1].

В связи с этим возникла проблема замены запрещенных хладагентов новыми рабочими веществами, которые не должны уступать по своим термодинамическим и эксплуатационным качествам, запрещенным или переходным хладагентам. Они должны быть максимально адаптированы к имеющемуся в мире огромному парку тепловых насосов. В настоящее время большинство заменителей фреонов групп CFC и HCFC, при использовании имеющихся ТН, не обеспечивают эксплуатационных показателей [2–4].

Другая проблема заключается в том, что для производных пропана, бутана или еще более тяжелых углеводородов, критическая температура и, как следствие, скрытая теплота фазового перехода снижаются с увеличением молекулярной массы. Однако главный недостаток всех гидрофторуглеродов состоит в относительно высоком значении потенциала глобального потепления по сравнению с природными хладагентами. Поэтому в настоящее время резко интенсифицировалось исследование по применению природных хладагентов, таких как аммиак, пропан, бутан, изобутан и диоксид углерода [5].

Одним из наиболее перспективных природных хладагентов для применения в холодильных системах и тепловых насосах является диоксид углерода ( $CO_2$ , R744). В настоящее время он нашел распространение в низкотемпературных установках, таких как, холодильные машины больших супермаркетов и складов, низкотемпературные ступени мощных промышленных морозильных установок. Главными достоинствами диоксида углерода является его доступность в больших количествах и дешевизна. Кроме того, он негорюч, неядовит, не разрушает озоновый слой и имеет самый низкий потенциал глобального потепления среди применяемых рабочих веществ.

Термодинамические циклы  $CO_2$  могут быть реализованы как в сверхкритической области, так и в докритической. Поэтому для  $CO_2$  существуют два типа циклов: транскритический и докритический. Для транскритического цикла характерно изменение давления от 30 до 100 бар и выше и возможность работы в сверх- и докритической области. Главным ограничением или даже недостатком применения  $CO_2$  является необходимость создания высокого рабочего давления (например, температура конденсации для 40 °C отвечает давлению в 85 бар). Учитывая эту особенность, в реальных про-

мышленных установках применяются каскадные циклы, в которых на верхней ступени в качестве хладагента применяется аммиак, а на нижней –  $CO_2$ . Принципиальная схема такого цикла приведена на рис. 1 [7].

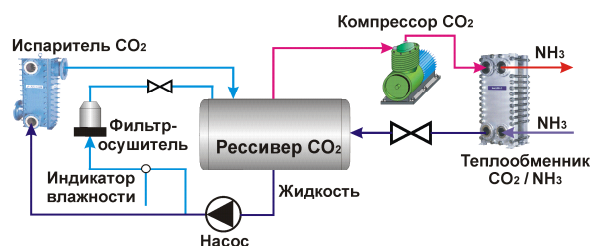


Рисунок 1 – Принципиальная схема каскадной установки с рабочими телами  $CO_2 - NH_3$

В каскадном цикле давление  $CO_2$  несколько ниже, чем в надкритическом цикле. Однако данная схема имеет и свои недостатки, которым относят [7]: рост давления в системе во время простоя холодильной установки и давление оттаивания в системе  $CO_2$ .

Для того, чтобы избежать роста давления во время простоя применяется несколько способов [7]:

- для поддержания давления в установке на принятом уровне используют дополнительную небольшую холодильную машину;
- устанавливают расширительный бак, обеспечивающий компенсацию увеличения давления в системе;
- проектируют систему таким образом, чтобы она могла выдержать давление при остановке, примерно равное 80 бар (давление насыщенного пара при комнатной температуре).

В установках, использующих диоксид углерода, применяется несколько способов оттаивания: естественное, водой, электрическое и горячим паром  $CO_2$ . Наиболее эффективным и быстрым является оттаивание горячим паром  $CO_2$ . Однако этот способ требует соблюдения специальных условий по давлению.

Главной проблемой таких установок является нежелательность попадания воды. При взаимодействии  $CO_2$  с водой образуется углекислота, которая может разъедать трубы и арматуру.

Вместе с тем можно перечислить ряд существенных достоинств холодильных установок, использующих  $CO_2$ , которые целиком и полностью компенсируют указанные недостатки, например, такие как:

- существенное сокращение материалоемкости компонентов установок (уменьшение размеров труб, арматуры и элементов автоматики) по сравнению с традиционным исполнением;
- за счет относительно высокого давления  $CO_2$  в системе, производительность и КПД компрессоров на диоксиде углерода существенно выше, чем на аммиаке;
- совместимость  $CO_2$  с различными металлическими материалами намного лучше, чем у других хладагентов, что позволяет применять материалы из латуни и меди;
- $CO_2$  безопасный хладагент, поэтому техническое обслуживание установок значительно проще и не требует суровых мер по технике безопасности;



➤ вода из системы может быть достаточно просто удалена при помощи фильтров-осушителей.

В ТН необходимо нагреть теплоноситель как минимум до 40 °С, а в большинстве случаев и выше до 90–100 °С. Разность температур на входе-выходе составляет 15–60 °С. Увеличение температуры теплоносителя пароконденсационных ТН связано с повышением температуры и давления конденсации, т.е. с повышением разности и отношений давлений конденсации и кипения. Это, в свою очередь, приводит к снижению коэффициента преобразования. В установках на R744 значительное изменение температуры при охлаждении газообразного диоксида углерода в надкритической области дает возможность нагреть теплоноситель на большую разность температур. Фактически конкурентная энергетическая эффективность ТН на R744 может быть достигнута только при достаточно большой разности температур теплоносителя. Это позволяет создавать ТН на  $CO_2$  большей тепловой мощности, чем фреоновые, вплоть до 50 МВт, по сравнению с 20 МВт для фреоновых ТН [6].

В настоящее время ТН, работающие на  $CO_2$ , классифицируют по мощности:

- малой мощности, с дроссельной схемой и поршневым компрессором с естественным охлаждением;
- большой мощности, с детандерной или дроссельной схемой и центробежным компрессором.

Обобщенная принципиальная схема теплового насоса на R744 представлена на рис. 2.

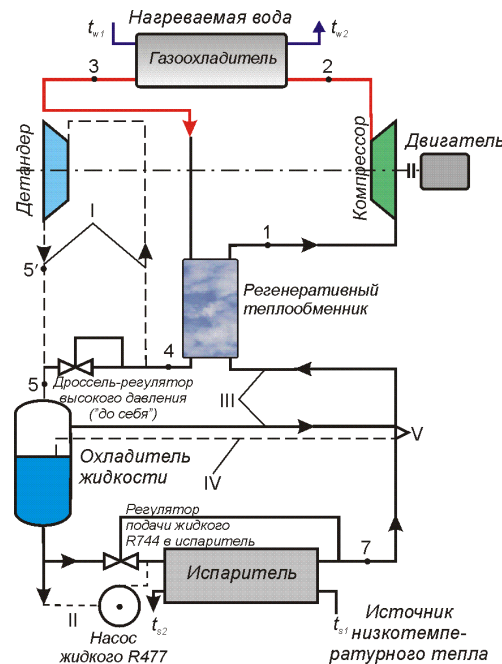


Рисунок 2 – Принципиальная схема теплового насоса на  $CO_2$  (R744) [6]:

- I – включение в систему детандера (в этом случае участок линии с дросселем-регулятором высокого давления закрыт);
- II – включение в схему циркуляционного насоса (в этом случае участок линии с регулятором подачи жидкого R744 в испаритель);
- III – линия газообразного R744 низкого давления;
- IV – парожидкостной смеси при включенной линии II (в этом случае участок линии V закрыт)

В качестве источника низкопотенциальной теплоты используются грунтовые воды и вода водоемов с температурой 8–12 °С, обратная вода систем охлаждения с температурой 18–25 °С, а также высокотемпературные тепловые сбросы с температурой >25 °С. Соответственно температура кипения  $CO_2$  в цикле на практике всегда лежит в диапазоне источника низкопотенциальной теплоты, т.е. в пределах 0–20 °С. Наиболее характерными параметрами являются температура кипения – 5 °С и температура теплоносителя – 80 °С.

Диоксид углерода относится к рабочим веществам высокого давления, и эффективность его использования определяется минимальной разностью температуры входа и выхода теплоносителя. В настоящее время R744 рассматривается как наиболее перспективный хладагент, как хладагент в низкотемпературных ступенях каскадных холодильных систем, тепловых насосах большой мощности или в качестве промежуточного хладагента в системах кондиционирования воздуха.

### Литература

1. Переход на озонобезопасные хладагенты в условиях России / Калнинь И.М., Катерухин В.В., Савицкий И.К., Смыслов В.И., Шаталов В.В. // Холодильная техника.– 1997.– №1.– С. 17–20.
2. Бубялис Э., Шкема Р. Перспектива ретрофита R22 и энергетические характеристики теплового насоса на базе компрессора КХГ-14.-1 // Пром. теплотехника, 2001.– Т.23, №1–2.– С. 79–83.
3. Колосков Ю.Д. Работа компрессионного теплового насоса на R142b // Холодильная техника, 1990.– №7.– С. 26–29.
4. Вассерман О.А., Фомінський Д.В. Термодинамічні властивості альтернативних хладагентів R32 і R125.– Одеса: Вид-во Одес. нац. морс. ун-та, 2002.– 256 с. (укр.)
5. Форбс Пирсон. Хладагенты – прошлое, настоящее и будущее // Холодильная техника, 2004.– №2.– С. 2–6.
6. Калнинь И.М., Васютин В.А., Пустовалов С.Б. Условия эффективного применения диоксида углерода в качестве рабочего вещества тепловых насосов // Холодильная техника, 2003.– №7.– С. 8–12.
7.  $CO_2$  як холодагент для промислового холоду // По матеріалам фірми «Danfoss».– Холод, 2006.– №2.– С. 26–27.

Работа выполнена при финансовой поддержке Европейского сообщества в рамках проекта SHERHPA, контракт № COLL-CT-2004-500229.

### Bibliography (transliterated)

1. Perehod na ozonobezopasnyie hladagentyi v usloviyah Rossii Kalnin I.M., Kateruhin V.V., Savitskiy I.K., Smyislov V.I., Shatalov V.V. Holodilnaya tehnika.– 1997.– #1.– p. 17–20.
2. Bubyalis E., Shkema R. Perspektiva retrofita R22 i energeticheskie harakteristiki teplovogo nasosa na baze kompressora KHG-14.-1 Prom. teplotehnika, 2001.– T.23, #1–2.– p. 79–83.
3. Koloskov Yu.D. Rabota kompressionnogo teplovogo nasosa na R142b Holodilnaya tehnika, 1990.– #7.– p. 26–29.
4. Vasserman O.A., Fominskiy D.V. Termodinamichni vlastivosti alternativnih hladagentiv R32 I R125.– Odesa: Vid-vo Odes. nats. mors. un-ta, 2002.– 256 p. (ukr.)

5. Forbs Pirson. Hladagentyi – proshloe, nastoyaschee i budushee Holodilnaya tehnika, 2004.– #2.– p. 2–6.

6. Kalnin I.M., Vasyutin V.A., Pustovalov S.B. Usloviya effektivnogo primeneniya dioksida ugleroda v kachestve rabocheho veschestva teplovyih nasosov Holodil-naya tehnika, 2003.– #7.– p. 8–12.

7. yak holodagent dlya promislavogo holodu Po materialam firmyi «Dan-foss».– Holod, 2006.– #2.– p. 26–27.

Rabota vyipolnena pri finansovoy podderzhke Evropeyskogo soobschestva v ramkah proekta SHERHPA, kontrakt # COLL-CT-2004-500229.

УДК 621.577:621.564

Товажнянський Л.Л., Капустенко П.О., Хавін Г.Л.

### ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ $CO_2$ (R744) В ТЕПЛОВИХ НАСОСАХ

Розглянуто питання застосування у теплових насосах природного хладагенту – діоксиду вуглецю. Наведено діаграму «тиск-ентальпія»  $CO_2$  та принципова схема теплового насосу на  $CO_2$  (R744). Обмірковуються особливості, недоліки та переваги використання  $CO_2$  у теплонасосних установках. Надано принципову схему каскадної установки с робочими тілами  $CO_2 - NH_3$ .

УДК 621.783.245

Усенко Ю.И., Иванов В.И., Скачков В.А., Болюк С.В.

## ПУТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ОДНОСТОПНЫХ КОЛПАКОВЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧАХ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Практика эксплуатации колпаковых электропечей для отжига стальной проволоки в бунтах свидетельствует о наличии существенной неравномерности распределения температуры как по высоте загрузки в целом, так и в радиальном направлении отдельных бунтов, что обусловлено несовершенством организации процессов внешнего теплообмена в их рабочем объеме.

Результаты экспериментальных исследований, проведенных на ряде металлургических заводов стран СНГ [1, 2], позволили установить, что на качество нагрева бунтов стальной проволоки в печах данного типа значительное влияние оказывает размещение источников и стоков тепловой энергии.

Одноstopные двузонные колпаковые электропечи типа СГЗ сталепроволочного цеха ОАО «Запорожский сталепрокатный завод» имеют установленную мощность 180 кВт, равномерно распределенную по высоте нагревательного колпака. В печах подвергают рекристаллизационному отжигу (нагрев при командной температуре 750 °С в течение 17,0 ч последующее охлаждение под отключенным колпаком до температуры 150 °С) загрузки из трех плотно намотанных бунтов проволоки марки БСтОМ с наружным диаметром 800–900 мм, внутренним диаметром 300–400 мм и высотой 400–500 мм.

При отжиге по данной технологии нагрев проволоки характеризуется наличием значительного и различного по высоте загрузки (в верхнем – 25, среднем – 40 и нижнем 75 °С) перепада температуры на наружной боковой поверхности бунтов в конце периода нагрева, что свидетельствует о нерациональности использования установленной мощности нагревательного колпака. При этом значительная часть нижнего бунта не нагревается до заданного температурного уровня (рисунок, кривые 1 и 2).

Одним из путей сокращения непроизводительных потерь теплоты в электропечах типа СГЗ является рациональное размещение установленной мощности в электрических зонах нагревательного колпака, по отношению к загрузке бунтов проволоки.

Для достижения подъема температуры на наружной боковой поверхности бунтов проволоки с минимальной по высоте загрузки неравномерностью проводили комплекс экспериментов, направленных на улучшение условий подвода теплоты к поверхности нижнего бунта в данной колпаковой электропечи, с использованием ее электро-тепловой модели [3].

Результаты исследования на модели зафиксировали следующее:

– равномерный нагрев наружной боковой поверхности металла по высоте загрузки бунтов достигается при перераспределении установленной мощности нагревательного колпака электропечи в сторону увеличения до 93 кВт в его первой (нижней) зоне и уменьшения до 75 кВт во второй (верхней) зоне;

– рациональное размещение мощности нагревательных элементов по высоте первой зоны колпака описывается выражением:

$$P_i = [1 - 0,87\delta_i + 0,42\delta_i^2] \cdot P_1 \cdot 10^{-2}, \quad (1)$$

где  $P_i$  – мощность  $i$ -того нагревательного элемента первой зоны, кВт;  $\delta_i$  – относительная высота размещения  $i$ -того нагревательного элемента,  $\delta_i = h_i/H_1$ ;  $h_i$  – расстояние от продольной оси  $i$ -того нагревательного элемента до основания колпака  $m$ ;  $H_1$ ,  $P_1$  – высота,  $m$ , и мощность, кВт, первой зоны колпака.

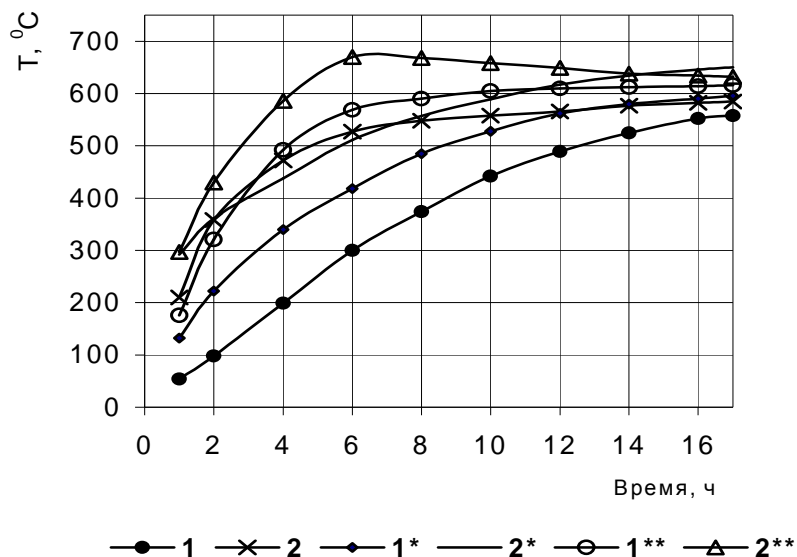


Рисунок 1 – Динамика изменения температуры в наружном (1, 1\*, 1\*\*) и внутреннем (2, 2\*, 2\*\*) витках проволоки марки БСтОМ нижнего бунта стопы  
 1, 2 – при отжиге по существующей технологии в печи с равномерным распределением мощности;  
 1\*, 2\* – при отжиге по существующей технологии в печи с предложенным распределением мощности;  
 1\*\*, 2\*\* – при отжиге по разработанной технологии в печи с предложенным распределением мощности

– перераспределение мощности между нагревательными элементами второй зоны колпака не оказывает заметного влияния на характер подъема температуры металла в загрузке, а условия их размещения существенно усложняются.

Промышленные испытания модернизированной электропечи типа СГЗ на ОАО «Запорожский сталепрокатный завод» показали, что увеличение сосредоточения мощности нагревательного колпака в его нижней зоне позволило значительно улучшить равномерность нагрева проволоки по высоте загрузки бунтов, а также повысить темп нагрева нижнего бунта (рисунок 1 – кривые 1\* и 2\*). Однако наличие значительного перепада температуры по сечению загрузки, величина которого в конце периода нагрева достигает 60–70 °С, ограничивает скорость подъема температуры внутренних витков бунтов.

В связи с этим определяли температурно-временные параметры отжига исследуемой проволоки, при реализации которых обеспечиваются как минимальная величина перепада температуры по сечению бунтов, так и низкие энергозатраты на его проведение.

При математическом моделировании исследуемого процесса распределение температуры по толщине намотки бунтов  $T(r, \tau)$  описывали одномерным дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности с нелинейными коэффициентами в цилиндрических координатах:

$$c(T) \cdot \rho(T) \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = \lambda(T) \cdot \left[ \frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right]; \quad (2)$$

с нелинейными условиями однозначности

$$T(r, 0) = T_{п,0} - \frac{\Delta T_0 \cdot \left( 1 - \frac{r^2}{R_2^2} + 2\omega^2 \cdot \ln \frac{r}{R_2} \right)}{1 - \omega^2 + 2\omega^2 \cdot \ln \omega}; \quad (3)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = \alpha_{изл}^{н-м} \cdot (T_n - T_m) + \alpha_{изл}^{\phi-м} \cdot (T_k - T_m); \quad (4)$$

$$\frac{\partial T(R_1, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad (5)$$

где  $c(T)$ ,  $\rho(T)$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К), и плотность металла, кг/м<sup>3</sup>;  $r$ ,  $\tau$  – пространственная и временная координаты, м, с;  $\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности стали, Вт/(м·К);  $T_n$ ,  $T_k$ ,  $T_m$  – температура нагревательных элементов, футеровки нагревательного колпака и металла, К;  $T_{п,0}$  – температура наружной поверхности бунта, К;  $\Delta T_0$  – разность температур по сечению бунта в начальный момент нагрева;  $\Delta T_0 = T(R_2, 0) - T(R_1, 0)$ ;  $R_1$ ,  $R_2$  – внутренний и наружный радиусы бунта, м;  $T(R_2, 0)$ ,  $T(R_1, 0)$  – температура наружной и внутренней поверхности бунта в начальный момент нагрева, К;  $\omega = R_1/R_2$ ;  $\alpha_{изл}^{н-м}$ ,  $\alpha_{изл}^{\phi-м}$  – коэффициенты теплоотдачи излучением в системах «нагреватели-металл», «кладка-металл», Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Численную реализацию математической модели (2)–(5) осуществляли локально-одномерным методом на ПЭВМ с применением неявной разностной схемы на равномерной сетке [4]. В расчетах учитывали зависимость теплофизических свойств стали от температуры [5]. При моделировании задавали среднемассовую температуру проволоки в начале и конце процесса отжига, изменяли командную температуру в зонах нагревательного колпака, а также продолжительность периодов нагрева и выдержки под отключенным колпаком на отдельных стадиях отжига. При этом оценивали как значение перепада температуры по сечению бунтов, так и величину удельных затрат тепловой энергии на проведение данного процесса.

Как показали результаты исследований на модели, вышеуказанным требованиям в наибольшей степени удовлетворяет режим, который предусматривает нагрев металла (в первой зоне при командной температуре 850 °С, во второй зоне при температуре 820 °С) в течение 10,2 ч и выдержку под отключенным колпаком в течение 3,3 ч.

Испытания разработанного режима отжига проводили на одной из электропечей типа СГЗ сталепроволочного цеха, оборудованной нагревательным колпаком с рациональным размещением мощности. Полученные результаты зафиксировали существенный рост темпа нагрева различных слоев среднего и нижнего бунтов загрузки (рисунок, кривые 1\*\* и 2\*\*). Максимальный перепад температуры между сходственными точками верхнего и нижнего бунтов в конце периода нагрева снизился до 5–10 °С для наружных витков, 15–20 °С – для срединных витков и 20–25 °С – для внутренних витков

соответственно, а величина температурного перепада между поверхностью наружных витков верхнего бунта и поверхностью внутренних витков нижнего бунта в конце периода нагрева не превышала 35–40 °С. Все участки бунтов исследуемой проволоки достаточное время находились в интервале отжигаемости. Повышение командной температуры в зонах печи позволило на 3,5 ч сократить продолжительность периода нагрева проволоки по сравнению с величиной, предусмотренной технологической инструкцией, при этом общая длительность процесса отжига не превышала 13,5 ч.

Оценку энергетической эффективности применения разработанных мероприятий выполняли путем составления балансов тепловой работы колпаковой электропечи до и после ее модернизации (табл. 1).

Таблица 1 – Тепловой баланс колпаковой электропечи типа СГЗ до (вариант I) и после (вариант II) реализации предложенных мероприятий

Наименование статей	I	II
<b>Приход теплоты, МДж (%):</b>		
– теплота, вносимая нагревательными элементами колпака	2814,5 (100,0)	2642,0 (100,0)
<b>Расход теплоты, МДж (%):</b>		
– нагрев бунтов проволоки	1108,9 (39,4)	1136,1 (43,0)
– нагрев муфеля и защитного газа	253,4 (9,0)	251,0 (9,5)
– аккумуляция футеровкой печи	492,5 (17,5)	517,8 (19,6)
– потери теплоты через футеровку печи и при коротких тепловых замыканиях	959,7 (34,1)	737,1 (27,9)
<b>Итого</b>	2814,5 (100,0)	2642,0 (100,0)

Анализ расходных статей теплового баланса при отжиге проволоки по разработанному режиму в колпаковой электропечи типа СГЗ после ее модернизации позволил установить:

- рост полезно используемой тепловой энергии, что соответствует повышению производительности печи;
- повышение (на 3,6 %) термического коэффициента полезного действия печи, что свидетельствует о возрастании ее тепловой экономичности;
- существенное снижение (на 6,2 %) потерь теплоты через футеровку печи и при коротких тепловых замыканиях.

Технико-экономические показатели тепловой работы колпаковой электропечи до и после реализации мероприятий по рациональному использованию тепловой энергии нагревательных элементов представлены в табл. 2. Видны очевидные преимущества реализации разработанных мероприятий с точки зрения энергопотребления: снижение на 12,7 % удельного расхода электроэнергии на нагрев металла, а также сокращение на 21,4 % длительности процесса отжига.

Сопоставление качественных показателей металла показывает, что после отжига в колпаковой электропечи по предложенному режиму проволока характеризуется более высокими и стабильными значениями пластических характеристик по сравнению с проволокой, подвергнутой отжигу по принятой технологии. Механические свойства отожженной проволоки также удовлетворяют требованиям стандарта.

По результатам проведенных исследований разработаны дополнения, которые были внесены в технологическую инструкцию по отжигу стальной проволоки марки БСтОМ.

Таблица 2 – Технико-экономические показатели колпаковой электропечи типа СГЗ до (I) и после (II) реализации предложенных мероприятий

Характеристика печи	I	II
Мощность нагревательного колпака, кВт:	180	168
– первая зона	90	93
– вторая зона	90	75
Показатели работы печи:		
– продолжительность нагрева, ч	17,0	13,5
– производительность печи, т/ч	0,176	0,231
– коэффициент полезного действия, %	39,4	43,0
– удельный расход электроэнергии, кВт·ч/кг	0,292	0,249

Дальнейшее совершенствование использования энергии в электропечах данного типа следует осуществлять как в направлении рационального размещения источников тепловой энергии на стенде и во внутренней полости загрузки бунтов стального проката, так и повышения степени использования объема ее рабочего пространства, а также реализации предварительного подогрева загрузки бунтов и утилизации теплоты охлаждаемой проволоки.

#### Литература

1. Тандура И.П., Иванов В.И., Баздырев В.С. и др. Повышение эффективности тепловой работы одностопных колпаковых электропечей // *Металлургическая и горно-рудная промышленность*. – 1985. – № 1 (135). – С. 33–34.
2. Усенко Ю.И., Михеев Ю.В., Иванов В.И. и др. Совершенствование процесса нагрева бунтов стальной проволоки в одностопных колпаковых электропечах // *Черная металлургия*. – 1992. – Вып. 7 (1119). – С. 30–32.
3. Усенко Ю.И., Горшков Ю.Ф., Иванов В.И. Электротепловое моделирование внешнего теплообмена в колпаковой электропечи // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 1992. – № 4. – С. 81–82.
4. Марчук Г.И., Шайдуров В.В. Повышение точности решения разностных схем. – М.: Наука, 1979. – 200 с.
5. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике. Справочник / Под ред. Б.Е.Неймарка. – М.:–Л.: Энергия, 1967. – 239 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Tandura I.P., Ivanov V.I., Bazdyirev V.S. i dr. Povyishenie effektivnosti teplovoy raboty odnostopnyih kolpakovyih elektropetchey *Metallurgicheskaya i gorno-rudnaya promyishlennost*. – 1985. – # 1 (135). – p. 33–34.
2. Usenko Yu.I., Miheev Yu.V., Ivanov V.I. i dr. Sovershenstvovanie protsessa nagreva buntov stalnoy provoloki v odnostopnyih kolpakovyih elektropetchah *Chernaya metallurgiya*. – 1992. – Vyip. 7 (1119). – p. 30–32.
3. Usenko Yu.I., Gorshkov Yu.F., Ivanov V.I. Elektroteplovoe modelirovanie vneshnego teploobmena v kolpakovoy elektropечи *Izvestiya vuzov. Chernaya metallur-giya*. – 1992. – # 4. – p. 81–82.
4. Marchuk G.I., Shaydurov V.V. Povyishenie tochnosti resheniya raznostnyih shem. – М.: Nauka, 1979. – 200 p.



5. Fizicheskie svoystva staley i splyvov, primenyaemyih v energetike. Spravochnik / Pod red. V.E.Neymarka. – M.:–L.: Energiya, 1967. – 239 p.

УДК 621.783.245

Усенко Ю.І., Іванов В.І., Скачков В.О., Болюк С.В.

### **ШЛЯХИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ОДНОСТОПНИХ КОВПАКОВИХ ЕЛЕКТРОПЕЧАХ**

Розроблено заходи щодо раціонального використання теплової енергії в ковпачкових електропечах опору типу СГЗ під час відпалювання бунтів сталевих дротів. Впровадження раціонального перерозподілу потужності за висотою нагрівального ковпачка та енергозберігаючого режиму відпалювання даного дроту дозволило суттєво знизити енергетичні витрати на проведення процесу, підвищити продуктивність печей і стабілізувати якісні показники дроту, що оброблено.

Александров Е.Е., Соловьев О.В., Беляев С.Н.

### ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ САМОЛЕТА ПРИ ПОСАДКЕ

В работе [1] рассмотрена структура цифровой системы автоматического управления (САУ) движением самолета по взлетно-посадочной полосе в процессе посадки, а также приведены алгоритмы управления, формируемые этой системой, под воздействием которых регулятор тормозных сил формирует управляющие тормозные моменты  $M_{\text{ТП}}[U(t)]$  и  $M_{\text{ТЛ}}[U(t)]$  по правому и левому бортам самолета. Суммарные тормозные моменты при этом равны

$$M_{\text{ТСП}}[U(t)] = M_{\text{ТОП}}(t) + M_{\text{ТП}}[U(t)]; \quad (1)$$

$$M_{\text{ТСЛ}}[U(t)] = M_{\text{ТОЛ}}(t) + M_{\text{ТЛ}}[U(t)], \quad (2)$$

где  $M_{\text{ТОП}}(t)$  и  $M_{\text{ТОЛ}}(t)$  – тормозные моменты по правому и левому бортам самолета, обусловленные воздействием летчика на тормозные педали правого и левого бортов.

Структурная схема замкнутой системы автоматического управления движением самолета при посадке приведена на рис. 1. Объект управления представляет собой совокупность тормозной системы, шасси и остова самолета. Летчик, воздействуя на педали тормозов правого и левого бортов, задает тормозные моменты  $M_{\text{ТОП}}(t)$  и  $M_{\text{ТОЛ}}(t)$  на колеса шасси, взаимодействующие с взлетно-посадочной полосой. В зависимости от возмущающих факторов, которые обуславливают различные моменты сопротивления качению колес вследствие различных размеров пятен контакта колес шасси с взлетно-посадочной полосой, на остов самолета действует разворачивающий момент, вызывающий потерю курсовой устойчивости движения самолета и способный привести к уходу самолета с взлетно-посадочной полосы. На рис. 2 показаны процессы движения самолета при посадке при управлении заданным направлением движения с помощью педалей тормозов. Анализ приведенных процессов свидетельствует о значительных отклонениях остова самолета от задаваемой траектории движения.

Цифровая САУ, описанная в работе [1], содержит в качестве чувствительных элементов датчики угловых скоростей и датчики линейных ускорений, расположенные относительно собственных осей инерции остова самолета. Бортовой вычислитель, используя алгоритмы, приведенные в работе [1], с помощью параметров Родрига–Гамильтона [2, 3] вычисляет переменные возмущенного движения самолета по взлетно-посадочной полосе, используя показания датчиков, входящих в состав САУ, и формирует сигнал управления в виде линейной комбинации этих переменных:

$$U[n] = k_{\psi} \Delta \psi[n] + k_{\dot{\psi}} \omega_{\psi}[n] + k_y \Delta y[n] + k_V V_{cy}[n] + k_W W_{cy}[n], \quad (3)$$

где  $\psi[n]$  – угловое отклонение продольной оси остова самолета от заданного направления;  $\omega_{\psi}[n]$  – угловая скорость остова относительно собственной вертикальной оси;  $\Delta y[n]$  – линейное смещение центра масс остова самолета относительно заданного на-

правления движения;  $V_{cy}[n]$  – скорость остова относительно собственной поперечной оси;  $W_{cy}[n]$  – линейное ускорение остова относительно собственной поперечной оси;  $k_{\psi}$ ,  $k_{\dot{\psi}}$ ,  $k_y$ ,  $k_v$ ,  $k_w$  – коэффициенты пропорциональности;  $n$  – номер такта съема информации с датчиков.

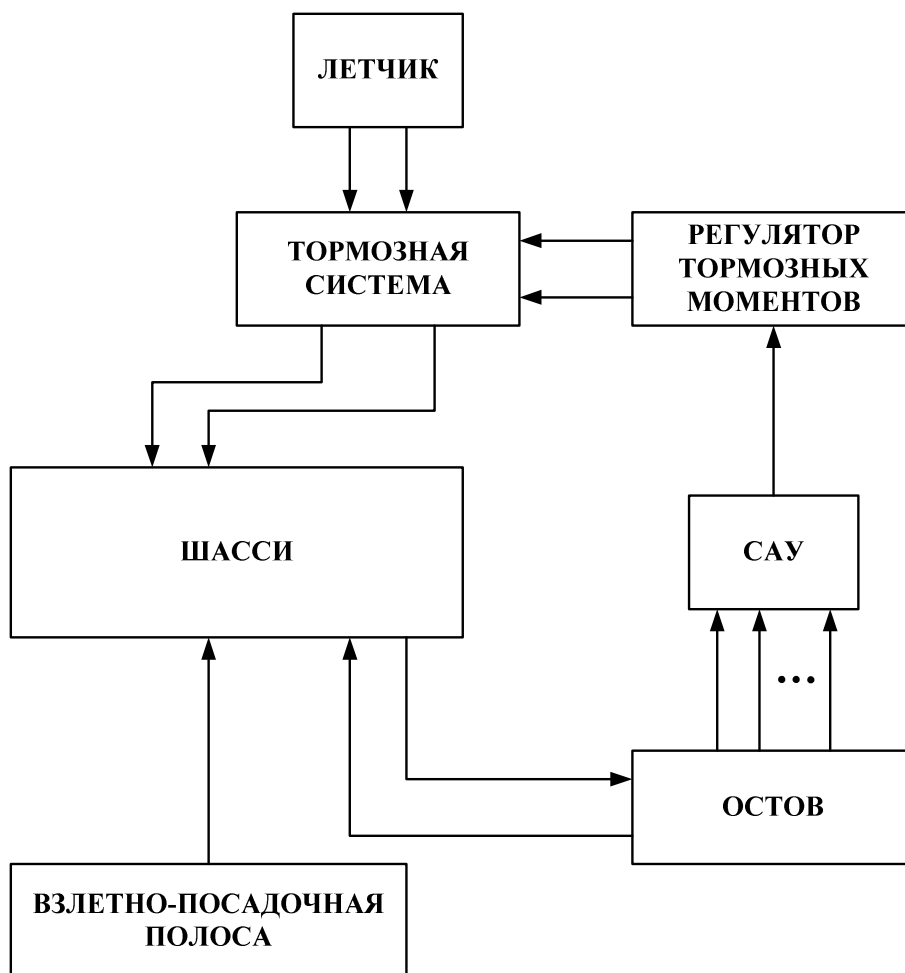


Рисунок 1 – Структурная схема замкнутой САУ

Сигнал (3) подается на вход регулятора тормозных моментов, формирующий управляющие тормозные моменты  $M_{тп}[U(t)]$  и  $M_{тл}(t)$ .

Задача параметрического синтеза САУ движением самолета при посадке состоит в выборе таких значений варьируемых коэффициентов алгоритма (3), чтобы на решениях математической модели замкнутой САУ достигал минимума аддитивный функционал

$$I = \sum_{i=1}^5 \beta_i^2 I_i, \quad (4)$$

который представляет собой взвешенную сумму функционалов

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \frac{1}{T\Delta\psi_{\max}^2} \int_0^T \Delta\psi^2(t); & I_2 &= \frac{1}{T\dot{\psi}_{\max}^2} \int_0^T \dot{\psi}^2(t); \\
 I_3 &= \frac{1}{T\Delta y_{\max}^2} \int_0^T \Delta y^2(t); & I_4 &= \frac{1}{TV_{\text{cy}\max}^2} \int_0^T V_{\text{cy}}^2(t); \\
 I_5 &= \frac{1}{TW_{\text{cy}\max}^2} \int_0^T W_{\text{cy}}^2(t),
 \end{aligned} \tag{5}$$

где  $\Delta\psi_{\max}$ ,  $\dot{\psi}_{\max}$ ,  $\Delta y_{\max}$ ,  $V_{\text{cy}\max}$ ,  $W_{\text{cy}\max}$  – максимально допустимые значения соответствующих параметров возмущенного движения.

Воспользовавшись результатами работ [4, 5], запишем соотношения для вычисления весовых коэффициентов аддитивного функционала (4):

$$\beta_i = \frac{1}{I_i^* \sum_{i=1}^n \frac{1}{I_i^*}}; \quad (i = \overline{1, 5}), \tag{6}$$

где через  $I_i^*$  обозначено минимальное значение  $i$ -того функционала (5), полученное при минимизации только его одного.

Математическая модель возмущенного движения объекта управления представляет собой частный случай комплексной функциональной математической модели (КФММ) колесной машины, приведенной в работе [6]. КФММ представляется в виде совокупности модулей, взаимодействующих друг с другом и внешней средой. Каждый из модулей КФММ соответствует элементу структурной схемы, приведенной на рис. 1.

Для отыскания значений  $I_i^*$  ( $i = \overline{1, 5}$ ) к уравнениям КФММ добавим еще одно уравнение

$$\begin{aligned}
 \frac{dS_1(t)}{dt} &= \Delta\psi^2(t); & \frac{dS_2(t)}{dt} &= \dot{\psi}^2(t); & \frac{dS_3(t)}{dt} &= \Delta y^2(t); \\
 \frac{dS_4(t)}{dt} &= V_{\text{cy}}^2(t); & \frac{dS_5(t)}{dt} &= W_{\text{cy}}^2(t).
 \end{aligned} \tag{7}$$

При интегрировании КФММ замкнутой системы на интервале  $[0, T]$  величина  $S_i(T)$  ( $i = \overline{1, 5}$ ) представляет собой значение интеграла, входящего в соответствующий функционал (5). Начальные условия при интегрировании КФММ следует выбирать равными:

$$\begin{aligned}
 \Delta\psi(0) &= \Delta\psi_{\max}; & \dot{\psi}(0) &= \dot{\psi}_{\max}; & \Delta y(0) &= \Delta y_{\max}; \\
 V_{\text{cy}}(0) &= V_{\text{cy}\max}; & W_{\text{cy}}(0) &= W_{\text{cy}\max}.
 \end{aligned}$$

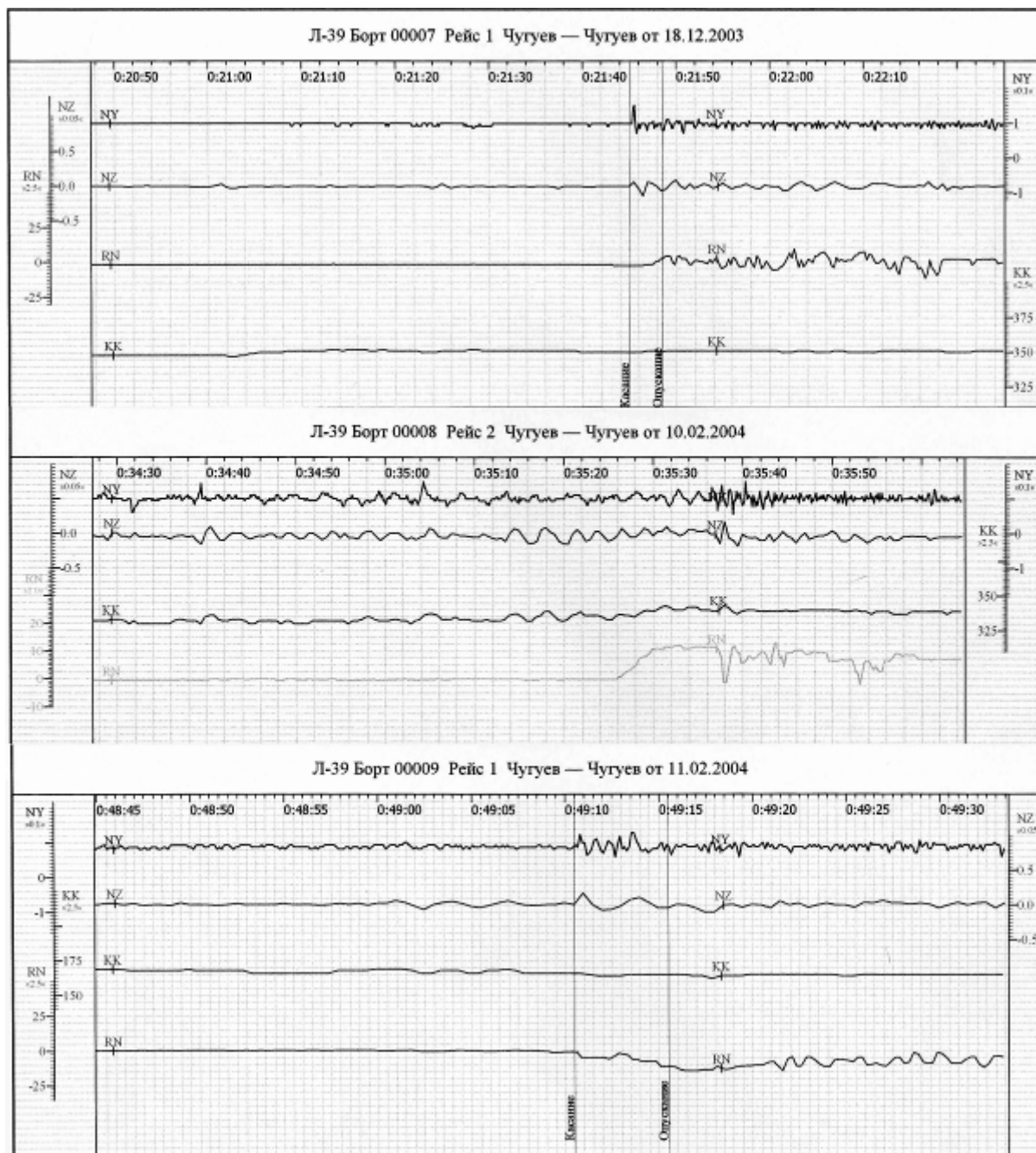


Рисунок 2 – Процессы возмущенного движения самолета при посадке с автоматическим управлением:

NY – перегрузка вертикальная; NZ – перегрузка боковая; RN – разность тормозных моментов; KK – курсовой угол

В пятимерном пространстве варьируемых параметров  $\{k_\psi, k_{\dot{\psi}}, k_y, k_v, k_w\}$  алгоритма (3) выберем стартовую точку  $\{k_{\psi 0}, k_{\dot{\psi} 0}, k_{y 0}, k_{v 0}, k_{w 0}\}$ , относительно которой построим план эксперимента [7]. В каждой точке плана произведем вычисление функции  $S_i(T)$  ( $i = \overline{1, 5}$ ). Затем выберем точку плана, в которой значение функции  $S_i(T)$  ( $i = \overline{1, 5}$ ) минимально  $\{k_{\psi 1}, k_{\dot{\psi} 1}, k_{y 1}, k_{v 1}, k_{w 1}\}$ , и относительно этой точки построим новый

план эксперимента. В результате такой многошаговой процедуры, называемой алгоритмом Бокса [7], приходим в точку  $\{k_{\psi m}, k_{\dot{\psi} m}, k_{y m}, k_{v m}, k_{w m}\}$ , в которой функция  $S_i(T)$  ( $i = \overline{1, 5}$ ) является минимальной (здесь  $m$  – количество шагов алгоритма Бокса). Обозначая через  $I_i^*$  ( $i = \overline{1, 5}$ ) минимальные значения функционалов (5), получим с помощью соотношений (6) значения весовых коэффициентов аддитивного функционала (4). Затем с помощью того же алгоритма Бокса отыщем точку  $\{k_{\psi}^*, k_{\dot{\psi}}^*, k_y^*, k_v^*, k_w^*\}$ , в которой достигается минимума аддитивный функционал (4).

На рис. 2 приведены процессы возмущенного движения самолета при посадке, зарегистрированные устройством диагностики и контроля параметров полета, с учетом работы системы управления движением по взлетно-посадочной полосе. Анализ этих процессов позволяет сделать вывод, что предлагаемая система обеспечивает высокое качество обработки задаваемой траектории движения.

### Литература

1. Александров Е.Е., Волонцевич Д.О., Соловьев О.В. и др. Повышение устойчивости и управляемости колесных машин в тормозных режимах. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – 320 с.
2. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Введение в теорию бесплатформенных навигационных систем. – М.: Наука, 1992. – 280 с.
3. Панов А.П. Математические основы теории инерциальной ориентации. – Киев: Наукова думка, 1995. – 279 с.
4. Александрова И.Е., Александрова Т.Е. О выборе весовых коэффициентов оптимизируемого функционала в теории аналитического конструирования оптимальных регуляторов // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2001. – № 1. – С. 135–137.
5. Александров Е.Е., Александрова Т.Е. Выбор оптимизируемого функционала в задачах параметрического синтеза систем стабилизации // *Артиллерийское и стрелковое вооружение*. – 2004. – № 2. – С. 23–26.
6. Александров Е.Е., Волонцевич Д.О., Туренко А.Н. и др. Динамика транспортно-тяговых колесных и гусеничных машин. – Харьков: ХГАДТУ, 2001. – 642 с.
7. Александрова И.Е. Имитационное моделирование. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2000. – 93 с.

### Bibliography (transliterated)

1. Aleksandrov E.E., Volontsevich D.O., Solovjev O.V. i dr. Povyishenie ustoychivosti i upravlyaemosti kolesnyih mashin v tormoznyih rezhimah. – Harkov: NTU «HPI», 2007. – 320 p.
2. Branets V.N, Shmyiglevskiy I.P. Vvedenie v teoriyu besplatformennyih navigatsionnyih sistem. – M.: Nauka, 1992. – 280 p.
3. Panov A.P. Matematicheskie osnovyi teorii inertsialnoy orientatsii. – Kiev: Naukova dumka, 1995. – 279 p.
4. Aleksandrova I.E., Aleksandrova T.E. O vyibore vesovyih koeffitsientov optimiziruемого funktsionala v teorii analiticheskogo konstruirovaniya optimalnyih regulyatorov *Radioelektronika, Informatika, upravlinnya*. – 2001. – # 1. – p. 135–137.

5. Aleksandrov E.E., Aleksandrova T.E. Vyibor optimiziruемого funktsionala v zadachah parametricheskogo sinteza sistem stabilizatsii Artilleriyskoe i strelkovoe vooruzhenie. – 2004. – # 2. – p. 23–26.

6. Aleksandrov E.E., Volontsevich D.O., Turenko A.N. i dr. Dinamika transportno-tyagovyih kolesnyih i gusenichnyih mashin. – Harkov: HGADTU, 2001. – 642 p.

7. Aleksandrova I.E. Imitatsionnoe modelirovanie. – Harkov: NTU «HPI», 2000. – 93 p.

УДК 629.017

Александров Є.Є., Соловйов О.В., Біляєв С.М.

### **ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РУХОМ ЛІТАКА ПРИ ПОСАДЦІ**

Розглядається задача вибору значень варійованих параметрів алгоритму керування рухом літака по злітно-посадочній смугі в процесі посадки.

УДК 629.735.45.036.3: 519.233.33

Анипко О.Б., Иленко Е.Ю.

## **СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОДНОРОДНОСТЬ ВЫБОРКИ ДАННЫХ ОБ ОТКАЗАХ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЕРТОЛЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба*

Современные авиационные двигатели (АД) эксплуатируются в широком диапазоне условий эксплуатации, которые с точки зрения влияния на надежность АД характеризуются рядом эксплуатационных факторов [1]:

1. Состояние воздушной среды (температура, влажность, давление, плотность).
2. Внешние воздействия атмосферы (порывы ветра, дожди, туманы, град, птицы, запыленность, радиация).
3. Условия полета (высота, скорость горизонтальная, скорость вертикальная).
4. Масса летательного аппарата (загрузка).
5. Уровень совершенства технического обслуживания.
6. Уровень подготовки летного и инженерно-технического состава.
7. Конструктивно-производственные особенности.
8. Характеристика эксплуатационного цикла (продолжительность полета, загрузка цикла).

В связи с этим возникает необходимость оценки влияния этих факторов или их сочетаний на интенсивность истощения ресурса.

В идеале такую оценку можно сделать на основе обработки экспериментальных исследований эксплуатации объектов авиационной техники (АТ) в идеальных, с точки зрения однородности, условиях, отличных от расчетного режима эксплуатации.

Однако такие экспериментальные исследования затруднительно проводить даже крупным производителям как авиационных двигателей, так и авиационной техники в целом. Причина заключается не только в больших финансовых и временных затратах, но и в необходимости обеспечения идентичности условий проведения эксперимента при существующем разнообразии всех возможных сочетаний неблагоприятных факторов. Поэтому представляет ценность информация об отказах и неисправностях, полученная из летных частей, при эксплуатации АТ в условиях, отличных от расчетных.

С целью оценки влияния эксплуатационных факторов на интенсивность истощения ресурса вертолетных двигателей авторами работ [2,3] была выбрана учебная авиационная часть. Спецификой эксплуатации двигателей в рассматриваемых условиях является характеристика эксплуатационного цикла, которая включает среднюю продолжительность полета и загруженность цикла, то есть долю в нем взлетного и номинального режимов работы двигателя. Такая особенность обусловлена требованиями программы курса учебно-летной подготовки летчиков, которая предусматривает выполнение определенного количества полетов с заданной продолжительностью и строгим содержанием полетного задания [4,5], что и позволяет в определенной степени считать условия эксплуатации двигателей одинаковыми, при отсутствии возможности проведения специальных экспериментов такого рода.

В работах [2,3] рассмотрены вопросы надежности двигателей ГТД-350, устанавливаемых на вертолетах Ми-2, при эксплуатации их в условиях летной учебной части. Дан анализ основных факторов, оказывающих влияние на надежность двигателей, осу-



ществлено прогнозирование  $\gamma$ -процентного ресурса двигателей. В основе исследований лежит анализ данных об отказах и неисправностях двигателей ГТД-350 за период с 1995 по 2006 год. Полученные в работах результаты свидетельствуют о снижении остаточного ресурса двигателей на соответствующих этапах эксплуатации по сравнению с расчетным режимом.

Эксплуатация исследуемых двигателей проводилась в близких климатических условиях, при одинаковых требованиях к погодным условиям для производства полетов, по единой программе подготовки летчиков и для контингента обучаемых, прошедшего одинаковую теоретическую подготовку. Однако условия проведения эксперимента нельзя считать идентичными. Отличия обусловлены изменениями температуры окружающей среды в течение суток, несоответствием погодных условий разных календарных лет, различным уровнем подготовки обучаемых по субъективным причинам. Несмотря на отличия отдельных условий, предлагаемый подход по обработке данных об отказах и неисправностях двигателей ГТД-350 можно считать достаточно корректным. Но такая оценка представляется поверхностной без проверки статистической однородности данных эксплуатации за 11 лет с точки зрения разработки регулярного подхода к решению задачи определения остаточного ресурса АД с учетом специфических условий эксплуатации.

Причиной необходимости решения вопроса о статистической однородности рассматриваемой выборки данных об эксплуатации авиационных двигателей, кроме различий во влиянии внешних факторов, может являться обработка данных об отказах [6]:

однотипных двигателей, но выпущенных разными заводами;

двигателей, выпущенных одним заводом, но в разное время, что может быть связано с введением в производство каких-либо изменений;

двигателей, эксплуатирующихся в разных условиях.

Формально – это задача о проверке статистических гипотез: должна быть проверена гипотеза о возможности пренебрежения различиями в надежности двигателей нескольких групп.

Для проверки статистических гипотез широкое применение нашел критерий согласия "хи-квадрат" Пирсона [6,7,8]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - M_i)^2}{M_i}, \quad (1)$$

где  $k$  – число групп, на которые разбиты статистические данные;  $m_i$  – число наблюдений изучаемого события, попавших в  $i$ -ю группу (число отказов);  $M_i$  – математическое ожидание числа событий (отказов) в  $i$ -й группе при принятой гипотезе.

$$M_i = \frac{t_{\Sigma i}}{T_{\text{дсд}}}, \quad (2)$$

где  $T_{\text{дсд}}$  – наработка на досрочное снятие двигателя в ремонт для всей совокупности двигателей с одинаковым межремонтным ресурсом;  $t_{\Sigma i}$  – общая наработка двигателей  $i$ -й группы.

Так как

$$T_{\text{дсд}} = \frac{t_{\Sigma}}{m_{\Sigma}}, \quad (3)$$

то выражение (2) можно записать в следующем виде

$$M_i = \frac{t_{\Sigma i} m_{\Sigma}}{t_{\Sigma}}, \quad (4)$$

где  $t_{\Sigma}$  – наработка всех групп двигателей с одинаковым межремонтным ресурсом;  $m_{\Sigma}$  – общее число отказов всех групп двигателей с одинаковым межремонтным ресурсом.

Проверка статистической гипотезы в рассматриваемой задаче сводится к проверке равенства

$$T_{\text{дсд}} = T_{\text{дсд1}} = T_{\text{дсд2}} = \dots = T_{\text{дсдк}}. \quad (5)$$

Распределение величины, вычисленной по формуле (1), приближается при большом числе опытов к распределению хи-квадрат с числом степеней свободы

$$r = k - s, \quad (6)$$

где  $s$  – число независимо наложенных связей или условий (число оцениваемых параметров).

Эксплуатация двигателей ГТД-350 проводилась на трех аэродромах. Для оценки однородности статистических данных об отказах, приводящих к досрочному снятию АД в ремонт, представляется целесообразным разделить исследуемые двигатели на группы в зависимости от места дислокации и величины межремонтного ресурса (1500, 1000, 750, 500 часов) с целью оценки однородности данных об отказах по критерию Пирсона.

В рассматриваемом случае число степеней свободы для трех групп двигателей ( $k = 3$ ) и одного оцениваемого параметра ( $s = 1$ ) равно  $r = 2$ .

Данные проверки однородности статистических данных об отказах для двигателей с межремонтными ресурсами 1500, 1000, 750, 500 часов приведены в таблицах 1, 2, 3, 4 соответственно. Значения наработки на досрочное снятие в ремонт для двигателей всех групп межремонтного ресурса были получены в работе [3] и составляют  $T_{\text{дсд1500}} = 845,4$  часа,  $T_{\text{дсд1000}} = 8531$  час,  $T_{\text{дсд750}} = 704,5$  часа,  $T_{\text{дсд500}} = 642,5$  часа.

Общее количество вертолетных двигателей ГТД-350, находящихся в эксплуатации, составило 177 единиц [3]. За рассматриваемый период некоторые АД эксплуатировались на разных аэродромах. Этим объясняется несоответствие суммарного количества АД, отраженного в таблицах 1-4, с их общим количеством.

На основании проведенного анализа данных об отказах вертолетных двигателей ГТД-350 с вероятностью не менее  $\gamma=0,95$  можно утверждать, что статистическая гипотеза об однородности выборки данных может быть принята для групп двигателей с межремонтным ресурсом 1500 часов, и с вероятностью  $\gamma=0,999$  - для групп двигателей с ресурсами 750 часов и 500 часов. Величина  $\gamma=0,95$  дает право рассматривать однородность данных как практически достоверное событие. Данные об отказах двигателей этих групп корректно использовать при анализе и прогнозировании показателей надежности.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Таблица 1 – Однородность статистических данных для двигателей с межремонтным ресурсом 1500 часов

№	Аэродром	Число АД	Наработка ГТД-350, час	Число отказов	$m_i - M_i$	$\chi_i^2$	$\chi_{0,95}$	Подтверждение гипотезы
1.	I	36	6376	8	0,46	0,03		гипотеза подтверждается $\gamma = 0,95$
2.	II	19	4029	1	-3,77	2,98		
3.	III	26	3122	7	3,31	2,96		
	Всего:	81	13527	16		5,96	5,99	

Таблица 2 – Однородность статистических данных для двигателей с межремонтным ресурсом 1000 часов

№	Аэродром	Число АД	Наработка ГТД-350, час	Число отказов	$m_i - M_i$	$\chi_i^2$	$\chi_{0,2}$	Подтверждение гипотезы
1.	I	21	6073	1	0,29	0,12		гипотеза не подтверждается ( $\gamma = 0,2$ )
2.	II	3	52	-	-0,01	0,01		
3.	III	12	2406	-	-0,28	0,28		
	Всего:	36	8531	1		0,40	0,446	

Таблица 3 – Однородность статистических данных для двигателей с межремонтным ресурсом 750 часов

№	Аэродром	Число АД	Наработка ГТД-350, час	Число отказов	$m_i - M_i$	$\chi_i^2$	$\chi_{0,999}$	Подтверждение гипотезы
1.	I	14	1572	4	1,77	1,40		гипотеза подтверждается $\gamma = 0,999$
2.	II	19	3590	1	-4,10	3,29		
3.	III	5	474	3	2,33	8,05		
	Всего:	38	5636	8		12,74	13,82	

Таблица 4 – Однородность статистических данных для двигателей с межремонтным ресурсом 500 часов

№	Аэродром	Число АД	Наработка ГТД-350, час	Число отказов	$m_i - M_i$	$\chi_i^2$	$\chi_{0,999}$	Подтверждение гипотезы
1.	I	20	1283	6	4,00	8,02		гипотеза подтверждается $\gamma = 0,999$
2.	II	18	2732	2	-2,25	1,19		
3.	III	9	2410	2	-1,75	0,82		
	Всего:	47	6425	10		10,04	13,82	

Данные об отказах групп двигателей с межремонтным ресурсом 1000 часов рассматривать как однородные некорректно по причине недостаточного количества наблюдений изучаемого события (отказов, приводящих к досрочному снятию двигателя в ремонт). Статистически эта группа двигателей не определена, что подтверждается результатом оценки однородности данных по критерию согласия "хи-квадрат" Пирсона.

#### Литература

1. Алексеев К.П. Надёжность и технико-экономические характеристики авиационных двигателей. – М.: Транспорт, 1980. – 102 с.
2. Анипко О.Б., Иленко Е.Ю. Факторы, влияющие на надежность вертолетного двигателя ГТД-350, как сложной технической системы / Збірник наукових праць ХУ ПС. – Харків: ХУ ПС. – 2005. – №5 – С. 26–29.
3. Анипко О.Б., Иленко Е.Ю. Прогнозирование  $\gamma$ -процентного ресурса вертолетного двигателя на основании данных эксплуатации / Інтегровані технології та енергозбереження. Збірник наукових праць НТУ «ХПІ». Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – №2 – С. 89–96.
4. Курс учебно-летней подготовки на учебном вертолете Ми-2 (КУЛП-УВ-95г).– Харьков: ХИЛ, 1995. – 104 с.
5. Анипко О.Б., Иленко Е.Ю. Эксплуатационный цикл авиационного двигателя как критерий оценки его ресурса / Збірник наукових праць ХУ ПС. – Харків: ХУ ПС. – 2006. – №2(8) – С. 4–6.
6. Акимов В.М. Основы надежности газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1981. – 207 с.
7. Косточкин В.В. Надежность авиационных двигателей и силовых установок. – М.: Машиностроение, 1976. – 248 с.
8. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятности и ее инженерные приложения. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Alekseev K.P. Nadyozhnost i tehniko-ekonomicheskie harakteristiki aviatsi-onnyih dvigateley. – M.: Transport, 1980. – 102 p.
2. Anipko O.B., Ilenko E.Yu. Faktoryi, vliyayuschie na nadezhnost vertoletnogo dvigatelya GTD-350, kak slozhnoy tehniceskoy sistemyi Zbirnik naukovih prats HU PS. – Harkiv: HU PS. – 2005. – #5 – p. 26–29.
3. Anipko O.B., Ilenko E.Yu. Prognozirovanie  $\gamma$  -protsentnogo resursa vertoletnogo dvigatelya na osnovanii dannyih ekspluatatsii Integrovani tehnologiyi ta energozberezheniya. Zbirnik naukovih prats NTU «HPI». Harkiv: NTU «HPI». – 2007. – #2 – p. 89–96.
4. Kurs uchebno-letnoy podgotovki na uchebnom vertolete Mi-2 (KULP-UV-95g).– Harkov: HIL, 1995. – 104 p.
5. Anipko O.B., Ilenko E.Yu. Ekspluatatsionnyiy tsikl aviatsionnogo dvigatelya kak kriteriy otsenki ego resursa Zbirnik naukovih prats HU PS. – Harkiv: HU PS. – 2006. – #2(8) – p. 4–6.
6. Akimov V.M. Osnovy nadezhnosti gazoturbinnnyih dvigateley. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 207 p.

7. Kostochkin V.V. Nadezhnost aviatsionnyih dvigateley i silovyih ustanovok. – М.: Mashinostroenie, 1976. – 248 p.

8. Venttsel E.S., Ovcharov L.A. Teoriya veroyatnosti i ee inzhenernyie prilozheniya. – М.: Vyisshaya shkola, 2000. – 480 p.

УДК 629.735.45.036.3: 519.233.33

Аніпко О.Б., Іленко Є.Ю.

**СТАТИСТИЧНА ОДНОРІДНІСТЬ ВИБІРКИ ДАНИХ  
ПРО ВІДМОВИ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВЕРТОЛІТНИХ ДВИГУНІВ**

За допомогою критерію "хі-квадрат" Пірсона перевірена статистична однорідність даних про відмови вертолітних двигунів ГТД-350 за 11 років їх експлуатації в умовах навчальної льотної частини.

Бирюков И.Ю.

**О ПРИМЕНИМОСТИ МОДЕЛИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ К ПРОЦЕССАМ СТАРЕНИЯ ПОРОХОВЫХ ЗАРЯДОВ**

Выстрел из огнестрельного оружия – весьма сложный и быстро протекающий процесс превращения химической энергии пороха сначала в тепловую энергию пороховых газов, а потом в кинетическую энергию движения снаряда и подвижных частей оружия. Для наиболее распространенного и массового вида вооружения – ствольных систем – порох является основным источником энергии. Поэтому для доставки боеприпасов до цели широко используются метательные взрывчатые вещества - пироксилиновые пороха [1].

В процессе длительного хранения пироксилиновые пороха, применяемые в боеприпасах к артиллерийскому оружию, способны самопроизвольно разлагаться и претерпевать различные физико-химические превращения. Эти изменения имеют место, как в результате чисто физических процессов (массоперенос, испарение, поглощение влаги), так и физико-химических процессов (рекристаллизация, эксудация), что негативно отражается на баллистических свойствах порохов, которые, в конечном итоге, могут измениться настолько, что практическое применение боеприпасов становится опасным и невозможным.

Анализ работ по моделям разложения порохов показывает, что в настоящее время не существует методов прогнозирования свойств пироксилиновых порохов на сроках эксплуатации более 5 лет и отсутствует модель эксплуатации боеприпасов на сроках эксплуатации более 10 лет.

До настоящего времени в доступных нам как отечественных, так и зарубежных публикациях [1–7] не обнаружено данных о методах анализа свойств порохов, позволяющих прогнозировать их изменения во времени.

Поэтому в настоящее время, исходя из объективно существующих больших сроков хранения пороховых зарядов, представляется важной задачей прогнозирования изменения их физико-химических свойств в течение длительного времени, величина которого составляет 30 лет. Во-первых, ввиду специфики их назначения, и, во-вторых, существенное влияние этих изменений на баллистические характеристики выстрелов. Эта проблема не нова и существует практически с момента широкого применения пироксилиновых порохов. Ее решению посвящены работы К.К. Андреева [2], Д. Янга [3], а также работы АН СССР, ГосНИИХП. В этих работах представлена общая теория разложения твердых веществ, приводятся данные о разложении порохов и их компонентов (нитроклетчатки) при различных условиях, однако не рассматриваются периоды времени, сравнимые со временем хранения этих боеприпасов.

Даже в последних работах М.Ф. Буллера и Г.В. Межевича [5–7], несмотря на глубину рассматриваемых методов испытания утилизируемых порохов, не приводится модель изменения физико-химических свойств порохов, что затрудняет прогноз таких изменений для дальнейшего их применения.

Кривая разложения ( $\alpha$  по  $t$ ) общего вида приведена на рис. 1, однако в отдельных случаях, кривые разложения могут иметь несколько другую форму, но на всех них наблюдается максимум скорости. Для кривых разложения общего вида (рис. 1) характерно начальное быстрое выделение газа ( $A$ ), ограничивающееся 0,1–5 % разложением.

Форма кривой в этой области обычно соответствует первому порядку, а энергия активации равна 3–5 ккал·мол<sup>-1</sup>, но известны заслуживающие внимания исключения, когда энергия активации достигает таких больших значений, как 40 ккал·моль<sup>-1</sup>. В первом из этих случаев предполагается физическая десорбция, а во втором – истинное поверхностное разложение [3].

За начальным периодом следует так называемый индукционный период (отрезок В), характеризующийся медленным выделением газа, иногда даже едва измеримым. В тех случаях, когда оказывается невозможным определить температурный коэффициент выделения газа на этой стадии, иногда удается определить длительность индукционного периода и из его температурной зависимости найти энергию активации. Необходимым условием этого является успешный анализ следующего участка С. Значения энергии активации, полученные таким образом, редко являются полноценными, так как они зависят от деталей интерпретации участков А и С. Кроме того, точки на аррениусовских графиках, получаемых из длительности индукционного периода, часто сильно рассеиваются. Особенно следует избегать произвольных определений индукционного периода, подобного такому, как: „время, необходимое для выделения газа в количестве, соответствующем 10<sup>-4</sup> мм на 1 мг образца”.

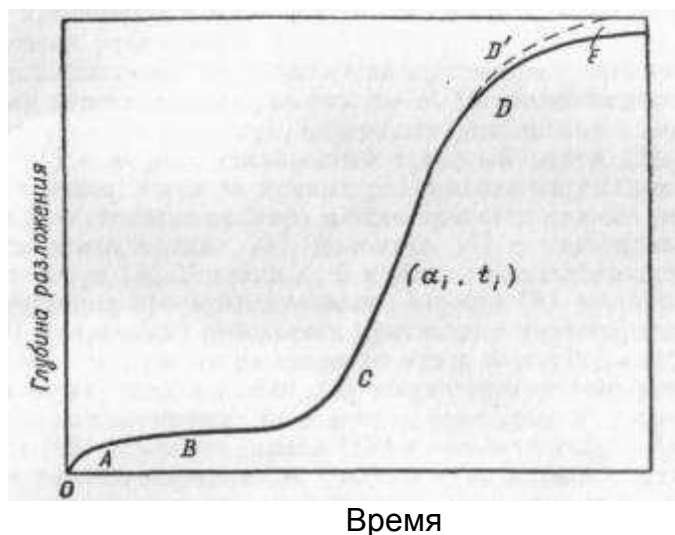


Рисунок 1 – Обобщенная кривая изометрического разложения

При наличии истинного индукционного периода за ним всегда следует период ускорения (отрезок С). Обычно он заканчивается при значениях  $\alpha_i$ , равных 0,1–0,5, хотя наблюдаются и более высокие значения  $\alpha_i$ . Период ускорения изучается наиболее усиленно, поскольку при однозначном анализе из этой части кривой получают наибольшую информацию. Стало обычным пытаться описать период ускорения с помощью выражений такого вида, как  $\alpha = f(\exp kt)$  или  $\alpha = f(kt^n)$ . В исключительных случаях получают почти полное соответствие этих простых выражений с экспериментальными данными. Однако обычно необходимо принимать компромиссное решение, вводя дополнительный соответственно подбираемый параметр  $t_0$ , входящий в выражение  $\alpha = f[(t - t_0)^n]$ . Все же переход от участка В к С иногда так нечеток, что результаты анализа становятся весьма неопределенными. Решение вопроса о том, являются ли процессы В и С строго последовательными или же конкурирующими, часто оказывается произвольным.

Переходный участок между отрезками С и D определяет величину максимальной скорости, на нем находится точка перегиба ( $\alpha_i$ ,  $t_i$ ). Если кривую нельзя описать с помощью простого выражения, содержащего величины, имеющие смысл констант скоростей, в некоторых случаях определяют энергию активации по максимальной скорости или же по времени достижения максимальной скорости  $t_i$ . Это допустимо при условии, что имеет место лишь один процесс, требующий активации. Последнее может быть доказано путем последовательного совмещения ряда кривых, выражающих зависимость  $\alpha$  от  $t$  при различных температурах, с одной из них, произвольно выбранной за стандартную. С этой целью значения  $t$  для каждой кривой умножают на отношение  $t_i$  (станд)/ $t_i$  (аффинное преобразование). Менее строгое доказательство состоит в проверке того, что  $\alpha_i$  не зависит от температуры. Во всяком случае, максимальная скорость не имеет большого теоретического значения, если только она не соответствует особым значениям  $\alpha_i$ .

Период спада D представляет большие трудности для анализа и имеет меньшую ценность с точки зрения интерпретации результатов, поскольку он в заметной степени зависит от особенностей распределения частиц по размерам на этой стадии разложения. Однако если влияние величины частиц удастся исключить, то участок D можно обычно описать с помощью степенного выражения, дающего объем сокращающейся оболочки сферической или другой формы, или же с помощью уравнения первого порядка.

Добавочные трудности вносит отсутствие воспроизводимости в периоде спада, обычно наблюдаемое при глубоком разложении. Так, для значений  $\alpha$ , больших 0,98, экспериментальная кривая часто идет ниже кривой D', вычисленной в предположении, что аналитическое выражение, применимое в основной области D, справедливо вплоть до значений  $\alpha = 1$ . Это отклонение, помеченное на рис.1 буквой E, называют „удержанием”. Большинство исследователей рассматривают это, в общем, плохо воспроизводимое явление, главным образом как помеху, считая, что оно возникает как результат влияния величины частиц, снижения реакционной способности из-за отравления и спекания или же из-за адсорбции газов на твердом продукте и других факторов. Тем не менее, это явление реально существует; в одном из исключительных случаев удержание составляет 70 % от теоретической величины разложения. Вместе с начальным процессом (отрезок А) удержание представляет одну из наименее исследованных характеристик кривых разложения.

Визуальное освидетельствование пороховых зарядов (цвет элементов, хрупкость, наличие повреждений поверхности) из-за отсутствия критериев оценки, не дает возможность определить степень его разрушения.

Следует подчеркнуть, что в ряде фундаментальных работ по внутренней баллистике [8–9] отмечается, что плотность пороха является основной его характеристикой, а, следовательно, по изменению ее значения можно судить и об изменении других физико-химических свойств таких, как теплота горения, скорость горения, которые определяют баллистические свойства выстрела.

На основе обзора и анализа работ [5–9] по определению состояния порохов имеются доступные методы, позволяющие ответить на принципиальный вопрос об изменении свойств порохового заряда. К ним относятся изменение плотности пороха – основного показателя, а, следовательно, и массы заряда; изменение цвета пороховых элементов, состояние их поверхности, хрупкость; скорость горения на открытом воздухе.



Так плотность трубчатого пороха определяли объёмно-весовым методом, причем объём элементов определяли на основе инструментального измерения геометрических размеров каждого порохового элемента с абсолютной погрешностью  $\Delta L = 0,1$  мм.

В настоящее время имеется большое количество зарядов, срок хранения которых существенно превышает гарантийный. В этой связи ведутся работы экспериментального и теоретического характера [10–12], направленные на прогнозирование физико-химических свойств пороховых зарядов и их влияния на баллистические характеристики на различных этапах эксплуатации боеприпасов.

Имеющиеся данные относятся к специальным испытаниям при  $t = 135^{\circ}$ – $165^{\circ}$  и  $200^{\circ}$  °С, что не соответствует условиям хранения, и свидетельствуют о том, что для боеприпасов длительного хранения характер зависимости имеет обратный вид, по сравнению с кондиционными порохами:

$$V_0 = f(P_{\max}). \quad (1)$$

Именно для кондиционных порохов – увеличение  $P_{\max}$  приводит к увеличению  $V_0$ , а для порохов длительного хранения с увеличением времени хранения возрастает  $P_{\max}$ , причем,  $V_0$  падает.

Поэтому возникает задача определения применимости положений теории термического разложения твердых веществ [2], к процессам разложения и изменения физико-химических свойств пороховых зарядов.

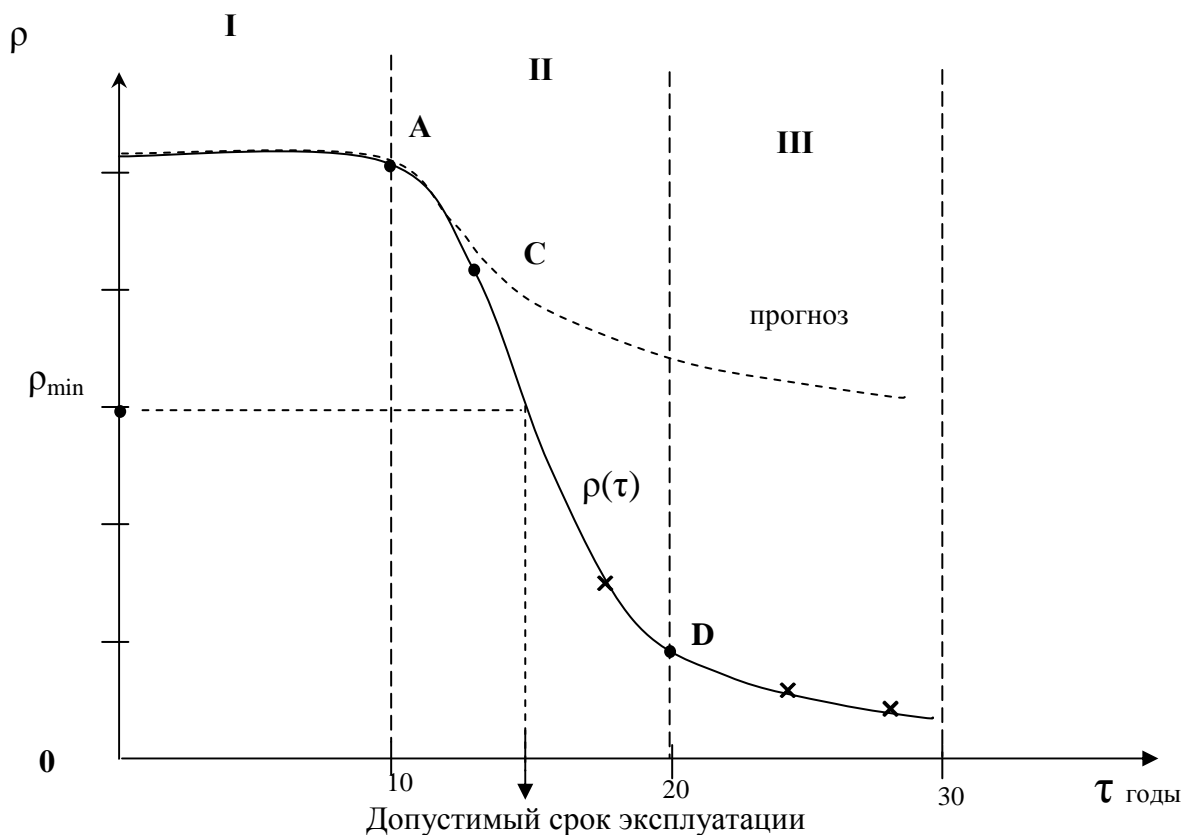


Рисунок 2 – Результаты исследований разложения порохов

× – экспериментальные значения плотности трубчатого пороха, определенные объемно-весовым методом

В итоге проведенного исследования изменения плотности пороха, можно выделить три периода (рис. 2):

**I** – низкая скорость изменения плотности пороха за счет добавок;

**II** – изменение физико-химических свойств пороха, зависящее от температуры окружающей среды и представляющий собой период максимальной интенсивности изменения плотности;

**III** – деградация порохов, скорость изменения плотности пороха резко снижается и плотность асимптотически приближается к минимальному значению.

Продифференцировав функцию  $\rho(\tau)$  по времени, можно получить график интенсивности изменения плотности пороха во времени. Кривая изменения плотности пороха во времени при распаде нитроклетчатки качественно представлена на рис. 3:

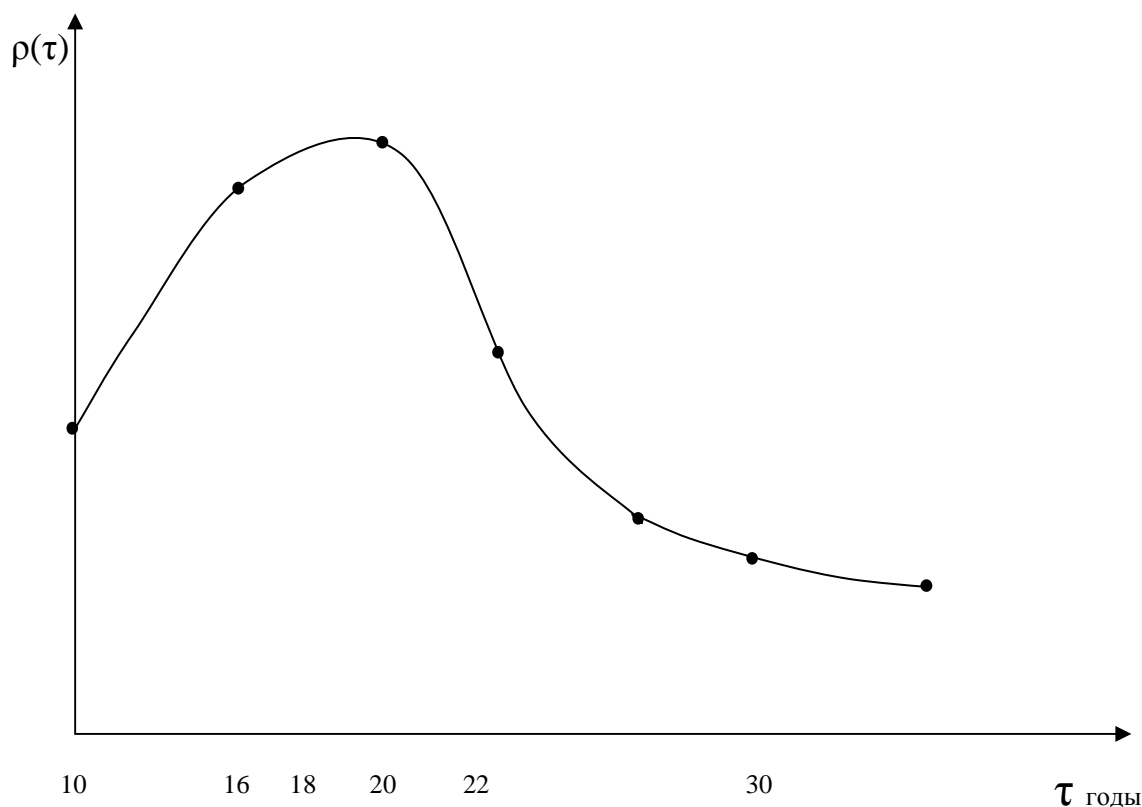


Рисунок 3 – Кривая изменения плотности пороха во времени

Таким образом, сопоставив данные о термическом разложении твердых веществ (рис. 1) и результаты исследований разложения порохов (рис. 2) можно заключить, что оба эти процесса характеризуются сходными периодами: низкой (иногда нулевой) скорости разложения в начальном периоде, интенсивного разложения и периода спада.

Практический интерес представляет определение моментов перехода от одного периода к другому – это соответствующие точки А, С и D.

В целом, можно заключить, что, по крайней мере, качественно модель термического разложения твердых веществ применима к процессам старения порохов. Даль-

нейшие исследования должны быть направлены на получение количественных характеристик процесса и кинетических констант.

Литература

1. Шагов Ю.В. Взрывчатые вещества и пороха. Воениздат. – М., 1976.
2. Андреев К.К. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. – М., Наука. 1966.
3. Янг Д.Я. Кинетика разложения твердых веществ. – М., Мир. 1969.
4. Горст А.Г. Пороха и взрывчатые вещества. – М.: Машиностроение, 1972.
5. Буллер М.Ф., Межевич Г.В. Утилизированные пороха. Определение массовой доли дифениламина. // Хім. пром. України. 2004. – № 6(65).
6. Межевич Г.В., Буллер М.Ф. Определение стабилизаторов химической стойкости в утилизированных порохам и топливах. // Хім. пром. України. 2002. – № 6(53).
7. Буллер М.Ф., Межевич Г.В. Методы испытания утилизируемых порохов. Шостка. Изд. "ДИА" – 2005.
8. Серебряков М. Е. Внутренняя баллистика.– М., Оборонгиз. 1949.
9. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. – М., Оборонгиз. 1962.
10. Анипко О.Б., Бирюков И.Ю. Методы термодинамики, тепло- и массопереноса для решения обратной задачи внутренней баллистики // Інтегровані технології та енергозбереження. Харків. НТУ „ХПІ”. 2005. №2.
11. Анипко О.Б., Бірюков І.Ю. Модель масопереносу при зберіганні порохових зарядів з урахуванням зміни температури оточуючої середовища // Математичні і інструментальні методи в технічних системах. Збірник наукових праць. Харків. ХУПС. 2006. №2.
12. Анипко О.Б., Бирюков И.Ю. Зависимость начальной скорости снаряда от максимального давления в канале ствола при выстреле зарядами длительного срока хранения // Інтегровані технології та енергозбереження. Харків. НТУ „ХПІ”. 2006. №2.

Bibliography (transliterated)

1. Shagov Yu.V. Vzryivchatyie veschestva i poroha. Voenizdat. – M., 1976.
2. Andreev K.K. Termicheskoe razlozhenie i gorenje vzryivchatyih veschestv. – M., Nauka. 1966.
3. Yang D.Ya. Kinetika razlozheniya tverdyih veschestv. – M., Mir. 1969.
4. Gorst A.G. Poroha i vzryivchatyie veschestva. – M.: Mashinostroenie, 1972.
5. Buller M.F., Mezhevich G.V. Utilizirovannyye poroha. Opredelenie massovoy doli difenilamina. Xim. prom. Ukrayini. 2004. – # 6(65).
6. Mezhevich G.V., Buller M.F. Opredelenie stabilizatorov himicheskoy stoykosti v utilizirovannyih porohah i toplivah. Xim. prom. Ukrayini. 2002. – # 6(53).
7. Buller M.F., Mezhevich G.V. Metodyi ispytaniya utiliziruemyih porohov. Shostka. Izd. "DIA" – 2005.
8. Serebryakov M. E. Vnutrennyaya ballistika.– M., Oborongiz. 1949.
9. Serebryakov M.E. Vnutrennyaya ballistika stvolnyih sistem i porohovyih raket. – M., Oborongiz. 1962.

10. Anipko O.B., Biryukov I.Yu. Metodyi termodinamiki, teplo- i massoperenosa dlya resheniya obratnoy zadachi vnutrenney ballistiki Integrovani tehnologiyi ta energozberezheniya. Harkov. NTU „HPI”. 2005. #2.

11. Anipko O.B., Biryukov I.Yu. Model massoperenosa pri hranenii porohovyih zaryadov s uchetom izmeneniya temperatury okruzhayushey sredy Matematichni i instrumentalni metodi v tehnicnih sistemah. Zbirnik naukovih prats. Harkov. HUPS. 2006. #2.

12. Anipko O.B., Biryukov I.Yu. Zavisimost nachalnoy skorosti snaryada ot maksimalnogo davleniya v kanale stvola pri vyistrele zaryadami dlitel'nogo sroka hraneniya Integrovani tehnologiyi ta energozberezheniya. Harkov. NTU „HPI”. 2006. #2.

УДК 623.52

Бірюков І.Ю.

### **ПРО ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛІ ТЕРМІЧНОГО РОЗКЛАДАННЯ ТВЕРДОЇ РЕЧОВИНИ ДО ПРОЦЕСІВ СТАРІННЯ ПОРОХОВИХ ЗАРЯДІВ**

Проаналізовано можливість використання моделі термічного розкладання твердих речовин до процесів старіння піроксілінових порохів. Показано можливість застосування цієї моделі на основі наслідків раніш виконаних експериментальних досліджень авторів.

Климов В.Ф., Колбасов А.Н.

### ЦИКЛОН ДЛЯ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ОБЪЕКТОВ БРОНИРОВАННОЙ ТЕХНИКИ

Создание высокооборотных форсированных двигателей поставило новые требования к системе очистки воздуха. В первую очередь необходимо обеспечить более высокую степень очистки воздуха при минимальных потерях производительности устройств, обеспечивающих подачу воздуха на питание двигателя, однако в силу целого ряда обстоятельств, высокая степень очистки воздуха возможна только с увеличением гидравлических потерь, затрачиваемых на очистку воздуха.

Простейшим элементом, в котором происходит очистка воздуха, является циклон. Принцип действия циклона основан на том, что забор очищенного воздуха всегда происходит из центральной зоны. В то же время пыль по циклону распределяется от центральной, нулевой зоны, к боковой стенке, увеличиваясь как по концентрации, так и по геометрическим размерам в сторону наружной стенки. Понятно, что очистка воздуха на уровне 100 % практически не может иметь место, т.к. в этом случае, аэродинамическое сопротивление циклона стремится к бесконечности и движение воздуха прекращается. Поэтому конструктивно выбирается такой вариант, при котором степень очистки воздуха соизмеряется с величиной аэродинамического сопротивления.

В упрощенном виде формула степени очистки воздуха имеет вид:

$$\eta_0 = 1 - 0,139 D^{0,97} \left[ \left( \frac{w d_1 f_2}{\mu} \right)^{-0,87} \Phi_1 C_1 + \dots + \left( \frac{w d_n f_n}{\mu} \right)^{-0,87} \Phi_n C_n \right],$$

где  $w$  – скорость газа на входе в циклон;  $f_2$  – удельный вес газовой среды;  $\Phi_1 \dots \Phi_n$  – содержание частиц пыли отдельных фракций по массе;  $C$  – коэффициент, равный  $\left( \frac{d_n f_n}{f_2} \right)^{-0,97}$ ;  $d_n$  – средний размер частиц пыли;  $D$  – наружный диаметр циклона.

Первая часть формулы показывает, что степень очистки воздуха всегда меньше единицы, т.е. меньше 100 % и всегда уменьшение является функцией зависящей от геометрических размеров самого циклона, фракционного состава пыли и скорости воздушного потока.

Простота циклона не отражает сложных газодинамических процессов, происходящих в самом циклоне. Потoki воздуха в циклоне представляют собой пространственное, вихревое и турбулентное движение.

До настоящего времени характер движения пылевоздушной смеси в циклоне изучен недостаточно и в настоящее время в Украине этим вопросом никто не занимается.

Частицы пыли по своей природе представляют собой разнообразные формы и сильно отличаются по массе. Если в общем виде можно представить движение частиц по известной квадратичной зависимости увеличения массы в сторону корпуса от нулевой центральной зоны, то на самом деле на каждую частицу пыли действуют силы, которые не поддаются строгому аналитическому закону их изучения. Потому формула определения степени очистки воздуха в циклоне носит эмпирический характер и дейст-

вительное значение степени очистки воздуха определяется по результатам экспериментальных исследований.

Впервые задачу по определению эффективности циклона решила Е.В. Калинина-Иванова, которая рассматривала положение частицы пыли в циклоне, исходя из условия, что на нее действует центробежная сила и сила аэродинамического сопротивления.

Центробежная сила определяется по выражению:

$$P_u = m_n \frac{v_t^2}{r},$$

где  $m_n$  – масса частицы пыли;  $v_t$  – тангенциальная составляющая скорости потока в циклоне;  $r$  – радиус, на котором находится частица в данный момент.

Сила аэродинамического сопротивления определяется по формуле Стокса:

$$P_c^I = 3\mu_B \pi \delta w_2,$$

где  $\mu_B$  – коэффициент динамической вязкости;  $w_2$  – скорость относительного движения частиц в потоке воздуха;  $\delta = \sqrt{\frac{24m_n}{\rho_n \pi}}$  – условный диаметр частицы пыли;  $\rho_n$  – плотность пыли.

Исходя из равенства  $P_u = P_c^I$ , получим

$$w_1 = \frac{\delta^2 \rho_n v_t^2}{18\mu_B r}.$$

Кроме эффективности системы очистки воздуха вторую немаловажную роль играет величина аэродинамического сопротивления. Понятие степени очистки и сопротивление находятся во взаимоисключающих условиях, выбор которых основан на удовлетворении каждого параметра. Величина сопротивления определяет степень очистки воздуха, и в то же время определяет сумму потерь объектовой мощности двигателя.

Расчет гидравлического сопротивления не представляет особой трудности и проводится по формуле:

$$\Delta P_u = \frac{1}{2} \xi_u \rho v_{ex}^2,$$

где  $\xi_u$  – коэффициент гидравлического сопротивления.

Именно определение  $\xi_u$  представляет наибольшую важность из-за неоднозначности и влияния многих геометрических и газодинамических параметров.

Коэффициент гидравлического сопротивления определяется по результатам исследований и может быть представлен в виде зависимости:

$$\xi_u = \frac{29F_{ex}}{F_{вых}} \sqrt{d_u / \left[ l_u - l_k \left( 1 + t_g \frac{f_k}{2} \right) \right]},$$

где  $F_{вх}$  – площадь входного патрубка циклона;  $F_{вых}$  – площадь выходного сечения центральной трубки;  $l_k$  – длина конической части циклона;  $l_{ц}$  – длина циклона общая;  $f_k$  – угол сужения конической части циклона.

За последние годы на основании результатов исследований геометрические размеры циклонов обратноточного типа были оптимизированы и разработана серия циклонов.

С учетом того, что реальный воздухоочиститель состоит из множества циклонов, объединенных в батарею, отдельно учитываются гидравлические сопротивления всех элементов воздухоочистителя.

Удельная воздушная нагрузка на один циклон определяется из условий:

- степени очистки воздуха;
- гидравлического сопротивления;
- коэффициента отсоса пыли из пылесборника воздухоочистителя.

При выборе циклона наиболее рациональным является геометрическое моделирование стандартного циклона, исходя из условий подобия. Таким способом создавался циклон для танков Т-80УД и последующих модификаций бронированной техники.

Критическими параметрами в этом случае были условия обеспечения нормальной длительной работы в режимах нормальной эксплуатации «брод». Для чего коэффициент пропуска пыли должен быть не ниже 0,2 %, аэродинамическое сопротивление  $1500^{+100}$  кгс/м<sup>2</sup>, коэффициент отсоса не менее 15 %.

### Выводы

1. К системам очистки воздуха бронированных объектов в настоящее время предъявляются повышенные требования – высокая степень очистки при минимальных потерях гидравлического сопротивления.

2. Основным элементом очистки воздуха является циклон обратноточного типа, рассчитанный по условиям удовлетворения всех требований. Наиболее рациональным является выбор циклона и его геометрических размеров на основании моделирования известного циклона с заданными характеристиками.

### Литература

1. Теория, конструкция и расчет танка. Под редакцией П.П. Исакова, Ленинград т.4. 1984 г.

### Bibliography (transliterated)

1. Teoriya, konstruktsiya i raschet tanka. Pod redaktsiey P.P. Isakova, Leningrad t.4. 1984 g.

УДК 623.438.32

Клімов В.Ф., Колбасов О.М.

## ЦИКЛОН ДЛЯ СИСТЕМИ ОЧИСТКИ ПОВІТРЯ ОБ'ЄКТІВ БРОНЬОВАНОЇ ТЕХНІКИ

У статті розглянуті основні мотиви створення ефективної системи очистки повітря, виходячи з умов вибору геометричних розмірів циклонів за умови високої ступені очищення повітря з мінімальними втратами гідравлічного опору, що забезпечили би роботу об'єкта в умовах нормального руху та в режимі руху при подоланні водяних перешкод.



УДК 623.4.016

Анипко О.Б., Рикунев О.Н., Бусяк Ю.М.

**АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИОРИТЕТОВ ЛЕГКИХ БОЕВЫХ  
КОЛЕСНЫХ И ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН**

В настоящее время большое значение имеет прогнозирование тактико-технических характеристик (ТТХ) легких колесных и гусеничных боевых бронированных машин (ЛК и Г ББМ) в непрерывно изменяющихся целях и задачах современного боя, основывающиеся на ретроспективных данных ТТХ, которые экстраполируются на период от 3-х до 5-ти лет. Такие краткосрочные прогнозы обусловлены динамикой изменения требований к ЛК и Г ББМ и изменением задач.

Применение прогнозирования базируется на гипотезе об эволюционном пути развития, что и делает возможным метод экстраполяции. Прогнозирование скачков в изменении значений ТТХ боевых машин практически невозможно определить известными математическими методами. Скорее такое прогнозирование может быть осуществлено интуитивно, специалистами высокого уровня, или на основе данных опроса большого числа экспертов. Как правило, эксперты анализируют ТТХ существующих боевых машин. В свою очередь боевые машины, наряду с высокими показателями ТТХ, также содержат следующие специфические особенности:

- несовершенная конструкторская школа;
- особенности технологии производства;
- ошибочная тенденция в разработке тактико-технических требований;
- финансовые ограничения;
- сжатые временные сроки;
- уровень квалификации эксплуатирующего персонала.

Таким образом, взяв для сравнения любой образец техники в качестве базового, одновременно наряду с его высокими показателями ТТХ автоматически берутся во внимание его специфические недостатки. Поэтому возникает необходимость в применении метода, который исключает эти недостатки. Таковым является метод сравнения по степени рациональности, разработанный в 90-х годах прошлого века [1]. Данный метод апробирован и нашел применение при анализе теплообменных аппаратов и авиационных двигателей. В качестве базового образца в методе берется идеальная машина, ТТХ которой составляют рациональные характеристики, одним из путей получения которых является метод экспертных оценок [2,5,6].

В настоящей работе представлены результаты анализа легких колесных и гусеничных боевых бронированных машин до 90-х и после 90-х годов выпуска, выполненного на основе метода сравнения по степени рациональности. Кроме этого приведено сравнение формулы приоритета полученной методом сравнения по степени рациональности и интуитивно.

Упомянутый выше метод предполагает проведение сравнения фактических значений ТТХ с рациональными значениями показателей ТТХ, определенных в результате обработки экспертных данных [2].

Значения рациональных показателей получены в результате проведенного анкетирования среди экспертов в составе 14 человек. Соответственно целью исследования результатов анкетирования являлось:

– определение максимальных и минимальных количественных показателей ТТХ ЛК и Г ББМ;

– определение рациональных значений показателей ТТХ ЛК и Г ББМ.

Для проведения анкетирования была составлена анкета, которая состоит из двух таблиц. Первая таблица содержит перечень количественных показателей ТТХ, в которой эксперту необходимо определить диапазон их допустимых значений и рациональное значение соответствующего показателя. Вторая таблица содержит перечень качественных показателей ТТХ колесных и гусеничных машин, где эксперту также необходимо определить их рациональные значения. При проведении обработки экспертных данных используется метод Дельфи [4].

В результате обработки экспертных данных получены рациональные значения показателей ТТХ колесных (таблица 2) и гусеничных (таблица 1) машин.

Таблица 1 – Рациональные значения показателей ТТХ гусеничных машин

Тип боевой машин	Удельная мощность, л.с./т	Калибр, мм	Скорость, км/ч	Бронепробиваемость, мм с 1000 м	Удельное давление на грунт, кг/см <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6
Гусеничные машины	37,5	100	80	450	0,65

Рациональный комплекс боевой гусеничной машины, по результатам анкетирования составляет:

1 – вооружение:

- 100 мм пушка;
- 7,62 мм спаренный пулемет;
- 30 мм гранатомет;
- ПТРК типа “выстрелил – забыл”.

2 – состав экипажа – 3+8 десант.

3 – уровень баллистической защиты – 5.

4 – уровень противоминной защиты – 4а.

5 – Система управления огнем:

- комбинированная “день – ночь”
- двухплоскостная стабилизация вооружения;
- лазерный дальномер и баллистический вычислитель;
- система автоматического сопровождения цели;
- аппаратура “свой – чужой”;
- система командного управления.

Таблица 2 – Рациональные значения показателей ТТХ колесных машин

Тип боевой машин	Удельная мощность, л.с./т	Калибр, мм	Скорость, км/ч	Бронепробиваемость, мм с 1000 м	Удельное давление на грунт, кг/см <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6
Колесные машины	28,5	40	120	120	0,9

Рациональный комплекс боевой колесной машины, по результатам анкетирования составляет:

- 1 – вооружение
  - 40 мм автоматическая пушка;
  - 7,62 мм спаренный пулемет;
  - 40 мм гранатомет;
  - ПТРК.
- 2 – Возможность установки боевых модулей различного боевого назначения.
- 3 – Состав экипажа – 3+8 десант.
- 4 – Уровень баллистической защиты – 5.
- 5 – Уровень противоминной защиты – 4а.
- 6 – Система управления огнем:
  - комбинированная “день – ночь”
  - двухплоскостная стабилизация вооружения;
  - лазерный дальномер и баллистический вычислитель;
  - система автоматического сопровождения цели;
  - аппарата “свой – чужой”;
  - система командного управления;
  - дистанционное управление.

Степень рациональности  $i^{го}$  технического показателя определяется как [1]

$$K_i^{RAZ} = \frac{R_i}{R_i^{RAZ}}, \quad (1)$$

где  $R_i$  – значение  $i^{го}$  фактического показателя ТТХ;  $R_i^{RAZ}$  – рациональное значение  $i^{го}$  показателя ТТХ.

$$\text{Если } R_i > R_i^{RAZ} \text{ то } K_i^{RAZ} = \frac{1}{\frac{R_i}{R_i^{RAZ}}}, \text{ и } \frac{R_i}{R_i^{RAZ}} \leq 1. \quad (2)$$

Если  $\frac{R_i}{R_i^{RAZ}} > 1$ , то это означает, что данная техническая система имеет запас по данной подсистеме или показателю.

Степень рациональности сложной технической системы боевых колесных и гусеничных машин

$$K_{\Sigma}^{RAZ} = \sum_{i=1}^5 K_i^{RAZ} \leq 5, \quad (3)$$

5 – количество показателей ТТХ.

Сравнение рациональных показателей ТТХ ЛК и Г ББМ, для определения лучшего образца боевой машины, проводится по значению показателей суммарной степени рациональности ТТХ.

Рассмотрим определение коэффициентов рациональности показателей ТТХ на

примере Bradley M2A2 1989 г.

Таблица 3 – Определение коэффициентов рациональности показателей ТТХ [3]

	Калибр, мм.	Удельная мощность, л.с.	Скорость, км/ч	Бронепробиваемость, мм с 1000 м.	Удельное давление на грунт, кг/см <sup>2</sup> .
$R_i$	25	18,1	61	66	0,65
$R_i^{RAZ}$	100	37,5	80	450	0,72
$K_{\Sigma}^{RAZ}$	0,25	0,48	0,76	0,15	0,90

Метод позволяет также оценить вклад каждого показателя (характеристик подсистем) в общий показатель степени рациональности [5]. На рисунке 1 приведена гистограмма вкладов отдельных значений показателей ТТХ для Bradley M2A2.

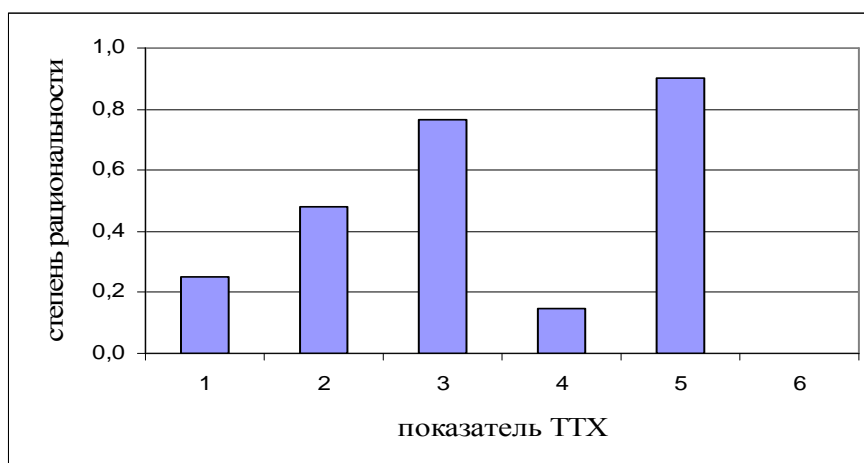


Рисунок 1 – Гистограмма значений показателей ТТХ для Bradley M2A2

$$K_{\Sigma}^{RAZ} = 2,54,$$

где 1 – калибр, мм; 2 – удельная мощность, л.с./т.; 3 – скорость, км/ч; 4 – бронепробиваемость, мм/1000 м.; 5 – удельное давление на грунт, кг/см<sup>2</sup>.

В результате применения метода сравнения по степени рациональности получены результаты по определению приоритетов для различных ЛК и Г ББМ.

В таблице 4–6 применены следующие сокращения в формуле приоритета:

- П – подвижность боевой машины;
- З – защищенность боевой машины;
- О – оружие боевой машины.

Таблица 4 – Формулы приоритета, полученные по методу сравнения степени рациональности и интуитивно, для ЛК ББМ

Ранг	Модель БТ	Интуитивно	Метод по степени рациональности	Суммарная степень рациональности
1	Pandur II – 2004 г	3-П-О	3-П-О	4,26
2	Rooikat – 1989 г.	О-П-3	П-3-О	4,05
3	БТР-90 – 2004 г.	П-О-3	П-О-3	4,04
4	Centauro – 1991 г.	О-П-3	П-3-О	3,94
5	Piranha-III 1999 г	П-3-О	П-О-3	3,88
6	Boxer – 2004 г.	3-П-О	3-П-О	3,82
7	Piranha-IV – 2003 г	3-П-О	П-О-3	3,75
8	VBCI – 2004 г.	3-П-О	П-3-О	3,65
9	AMV XC-360P – 2001 г.	3-П-О	П-О-3	3,6

Таблица 5 – Формулы приоритета, полученные по методу сравнения степени рациональности и интуитивно для ЛГ ББМ до 1990 г.

Ранг	Марка БТ	Интуитивно	Метод по степени рациональности	Суммарная степень рациональности
1	БМП-3 1987 г	О-П-3	О-3-П	3,51
2	Warrior 1986 г.	П-3-О	П-О-3	3,12
3	Bradley M2A0 1981 г.	П-3-О	П-О-3	2,65
4	Marder 1 1969 г	П-3-О	П-О-3	2,55
5	Bradley M2A2 1989 г	3-П-О	П-3-О	2,54
6	Marder 1A2 1983 г.	П-3-О	П-О-3	2,51
7	Marder 1A3 1989 г.	3-П-О	П-3-О	2,26

Таблица 6 – Формулы приоритета, полученные по методу сравнения степени рациональности и интуитивно для ЛГ ББМ после 1990 г.

Ранг	Марка БТ	Интуитивно	Метод по степени рациональности	Суммарная степень рациональности
1	CV-90 – 1993 г.	3-П-О	П-О-3	3,1
2	ASCOD – 1996 г. (Ulan – Pizzaro)	3-О-П	П-3=О	2,99
3	VCC-80 Dardo – 1992 г	3-П-О	П-О-3	2,98
4	Puma 2005 г прототип	3-П-О	П-3=О	2,78
5	Bradley M2A3 – 1998 г.	3-П-О	П-О-3	2,54
6	Marder 1Mk-30 – 2004 г.	3м-О-П	П-О-3	2,49
7	Marder 1A5 – 2002 г	3-П-О	П-О-3	2,21

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- 1) разработан подход к проведению анализа и сравнению технических характеристик;
- 2) интуитивный метод не совсем согласуется с методом экспертной оценки;
- 3) просматривается тенденция незначительного повышения суммарного коэффициента рациональности в категории ЛГ ББМ после 1990 года выпуска;

4) характер профессиональной направленности экспертов существенно влияет на результаты примененного метода.

Однако критически оценивая полученные результаты, следует отметить что:

1) Повышение значений показателей ТТХ “Marder-1” (1969, 1983, 1989, 2002г.), особенно баллистической и противоминной защиты, привело к уменьшению  $\Sigma K^{RAZ}$ ;

2)  $\Sigma K^{RAZ}$  “Marder-1” >  $\Sigma K^{RAZ}$  “Marder 1Mk-30”, что явно не соответствует действительности;

3)  $\Sigma K^{RAZ}$  “Bradley-A0” >  $\Sigma K^{RAZ}$  “Bradley-A2”, что также не соответствует действительности;

4) Значение показателей ТТХ “Warrior” существенно ниже, чем у всех гусеничных машин после 1989 года, а  $\Sigma K^{RAZ}$  >  $\Sigma K^{RAZ}$  гусеничных машин, которые выпускались после 1989 года;

5) Значение показателей ТТХ “Puma” значительно выше, чем у “CV-90”, однако  $\Sigma K^{RAZ}$  “CV-90” >  $\Sigma K^{RAZ}$  “Puma”.

Очевидно, получение таких результатов связано с тем, что в данном анализе было использовано пять показателей, которые в полной мере не могут описать сложные технические системы, каковыми являются ЛК и Г ББМ. При этом приводились различные показатели огневой мощи, защищенности, подвижности, поэтому представляется целесообразным по всем трем группам приоритетов ввести единые показатели для корректности сравнения характеристик. Таковыми являются:

– по огневой мощи:

1)  $t_0$  – время обнаружения цели и ее идентификация в типовых нормированных условиях с вероятностью  $P_0=0,9$  (с учетом целеуказания, в том числе внешнего целеуказания);

2)  $t_{ин}$  – время поражения цели после идентификации с вероятностью  $P_{ин}=0,9$ ;

3) R – боевой ресурс – количество типовых целей, пораженных полным боекомплектком.

– по защищенности:

1)  $t_{30}$  – время, необходимое противнику (с нормированными характеристиками средств разведки) для обнаружения и опознавания ББМ в типовой боевой ситуации (демаскирующие факторы);

2)  $t_n$  – время, необходимое противнику (с нормированными характеристиками средств поражения), для нанесения ББМ повреждений;

3)  $P_{гиб}$  – вероятность безвозвратных потерь (характеристика боевой живучести).

– по подвижности:

1)  $t_{марш}$  – время выполненного типового (нормированного) марша;

2)  $P_{маневр}$  – вероятность совершения защитного маневра на поле боя;

3)  $P_{марш}$  – вероятность совершения скрытного марша группой ББМ.

Кроме того, в существующих данных баллистическая защита представляется по 5 категориям, что также относится и к противоминной защите, которая разделена на 4 категории, согласно STANAG – 4164, значения которых приведены ниже.

Таблица 7 – Уровни баллистической защиты

Уровень	1	2	3	4	5
Эквивалентная защитная преграда под углом 0°, на дальности, мм.	9/30м	14/30м	17/30м	58/200м или 28/500м	62/500м

Таблица 8 – Уровни противоминной защиты в тротиловом эквиваленте

Уровень		1	2	3	4
а	под днищем, кг.	До 4	6	8	10
б	под колесом (колесом), кг.	До 4	6	8	10

Учитывая то, что существует множество источников информации о ТТХ боевых колесных и гусеничных машин, этот материал для удобства проведения анализа обобщен и приведен в таблице 9.

Таблица 9 – Показатели ТТХ ЛК и Г ББМ

Наименование	Marder-1	Marder-1A1	Bradley M2	Marder-1A2
Год начала производства	1969	1979	1981	1983
Экипаж, чел (ОУ+БО+ДО)	1+2+7	1+2+7	1+2+6	1+2+7
Боевая масса, кг	28 200	28 200	21 300	29210
Удельная мощность, л.с./т	21,3	21,3	23,5	20,5
Удельное давление на грунт, кг/см <sup>2</sup>	0,75	0,75	0,52	0,78
Уровень баллистической защиты				
- лоб	4	4	4	4
- борт	3	3	3	3
Защита от РПГ	–	–	–	–
Уровень противоминной защиты	3	3	3	3
Модульная легкоъемная конструкция бронезащиты	–	–	–	–
Система предупреждения о лазерном облучении	–	–	–	–
<b>Вооружение</b>				
пушка, мм	20мм Rh202	20мм Rh202	25мм M242	20мм Rh202
бронепробиваемость, мм/0 <sup>0</sup> /1000м	40	40	66	40
пулемет, мм	1x7,62+ 1x7,62 (ДУ)	1x7,62+ 1x7,62 (ДУ)	1x7,62	1x7,62
автоматич. Гранатомет, мм	–	–	–	–
ПТРК	–	Milan	Tow	Milan
<b>СУО</b>				
упрощенное	+	+	–	–
танкового типа	–	–	+	+
панорамический прибор наблюдения	–	теплопеленгатор опция Marder-1A3	–	+
Тепловизионные прицельные приборы	–	–	–	–
Дистанционно-управляемый боевой модуль	–	–	–	–
С <sup>4</sup> Г	–	–	–	–
<i>Примечание</i>	<i>Вынесенное вооружение 20 мм и ДУ пулеметная установка</i>		<i>СУО без лазерного дальномера</i>	

Наименование	Bradley M2A1	Warrior MCV-80	БМП-3	Marder-1A3
Год начала производства	1986	1986	1987	1989
Экипаж, чел (ОУ+БО+ДО)	1+2+6	1+2+6	1+2+7	1+2+7
Боевая масса, кг	22 940	23 500	18 700	33 500
Удельная мощность, л.с./т	21,8	23,4	27,8	17,9
Удельное давление на грунт, кг/см <sup>2</sup>	0,54	0,67	0,61	0,89
Уровень баллистической защиты				
- лоб	4	4	4	5
- борт	3	4	3	5
Защита от РПГ	–	–	–	+
Уровень противоминной защиты	3	3	3	3
Модульная легкоъемная конструкция бронезащиты	–	–	–	+
Система предупреждения о лазерном облучении	–	–	+ с 2005г. “Штора”	–
<b>Вооружение</b>				
пушка, мм	25мм M242	30мм Rarden	100мм – орудие 30мм 2A72	20мм Rh202
бронепробиваемость, мм/0 <sup>0</sup> /1000м	66	60		40
пулемет, мм	1x7,62	1x7,62	1x7,62 + 2x7,62	1x7,62
автоматический гранатомет, мм	–	–	–	–
ПТРК	Tow-2	–	9M117 “Бастион”	Milan-2
<b>СУО</b>				
упрощенное	–	+	–	–
танкового типа	+	–	+	+
панорамический прибор наблюдения	–	–	–	+
Тепловизионные прицельные приборы			+ (1993)	
Дистанционно-управляемый боевой модуль	–	–	–	–
С <sup>4</sup> I	–	–	–	–
<i>Примечание</i>	<i>СУО без лазерного дальномера</i>			<i>СУО танка Леопард-2A4</i>



Продолжение таблицы 9

<b>Наименование</b>	<b>Bradley M2A2</b>	<b>Warrioz</b>	<b>CV-90</b>	<b>Desert Warrioz</b>
Год начала производства	1989	1990	1993	1994
Экипаж, чел (ОУ+БО+ДО)	1+2+6	1+2+7	1+2+8	1+2+7
Боевая масса, кг	33 000	26 000	22 800	26 000
Удельная мощность, л.с./т	18,2	21,7	26,5	21,7
Удельное давление на грунт, кг/см <sup>2</sup>	0,72	0,77	0,53	0,77
Уровень баллистической защиты				
- лоб	5	4	5	4
- борт	5	4	4	4
Защита от РПГ	+ (ДЗ)	+	-	-
Уровень противоминной защиты		3		3
Модульная легкоъемная конструкция бронезащиты	+	+	+	+
Система предупреждения о лазерном облучении	-	-	+ опция	+
<b>Вооружение</b>				
пушка, мм	25мм M242	30мм Rarden	40мм L70B	30мм Rarden
бронепробиваемость, мм/0 <sup>0</sup> /1000м	66	60	140	60
пулемет, мм	1x7,62	1x7,62	1x7,62	1x7,62
автоматический гранатомет, мм	-	-	-	-
ПТРК	Tow-2	Milan (1991)		Tow
<b>СУО</b>				
упрощенное	-	+	-	-
танкового типа	+	-	+	+
панорамический прибор наблюдения	-	-	-	-
Тепловизионные прицельные приборы	+	-	+	
Дистанционно-управляемый боевой модуль	-	-	-	-
C <sup>4</sup> I	-	-	+ (опция с 2006)	-
<i>Примечание</i>				<i>Опция – боевой модуль Delco с 25мм пушкой</i>

Наименование	ASCOD	Bradley M2A2ODS	VCC-80 Dardo	Bradley M2A3
Год начала производства	1996	1996	1998	1998
Экипаж, чел (ОУ+БО+ДО)	1+2+8	1+2+6	1+2+6	1+2+6
Боевая масса, кг	25 800 (27 500)	33 000	19 000	33 000
Удельная мощность, л.с./т	23,3 (21,8)	18,2	27,4	18,2
Удельное давление на грунт, кг/см <sup>2</sup>		0,72	0,66	0,72
Уровень баллистической защиты				
- лоб	5	5	4	5
- борт	5	5	3	5
Защита от РПГ	+(ДЗ)	+	-	+
Уровень противоминной защиты		3		3
Модульная легкоъемная конструкция бронезащиты	+	+	+	+
Система предупреждения о лазерном облучении	-	-	+	+
<b>Вооружение</b>				
пушка, мм	30мм Mauser F	25мм M242	25мм КВА	25мм M242
бронепробиваемость, мм/0 <sup>0</sup> /1000м	120	66	66	66
пулемет, мм	1x7,62	1x7,62	2x7,62	1x7,62
автоматический гранатомет	-	-	-	-
ПТРК		Tow-2	Milan (Tow)	Tow-2
<b>СУО</b>				
упрощенное	-	-	-	-
танкового типа	+	+	+	+
панорамический прибор наблюдения	-	-	+	-
Дистанционно-управляемый боевой мо- дуль	-	-	-	-
С <sup>4</sup> I	-	-	-	+
Тепловизионные приборы	+	+	+	+
<i>Примечание</i>			<i>СУО тан- ка "Arrie- ta" Tow- опция</i>	

Продолжение таблицы 9

<b>Наименование</b>	<b>Marder-1A5</b>	<b>Puma</b>	<b>Bradley M2A3+</b>
Год начала производства	2002	2008 (прогноз)	2008 (прогноз)
Экипаж, чел (ОУ+БО+ДО)	1+2+7	3+7 (8)	1+2+6
Боевая масса, кг	37 000	43 000	33 000
Удельная мощность, л.с./т	16,2	18,3	18,2
Удельное давление на грунт, кг/см <sup>2</sup>	0,98		
Уровень баллистической защиты			
- лоб	5	5	5
- борт	5	5	5
Защита от РПП	+	+	+
Уровень противоминной защиты	4	4	3
Модульная легкоъемная конструкция бронезащиты	+	+	+
Система предупреждения о лазерном облучении			
<b>Вооружение</b>			
пушка, мм	20мм Rh202	30мм Мк 30-2	45мм или 50мм пуш- ка
бронепробиваемость, мм/0 <sup>0</sup> /1000м	40	120	160
пулемет, мм	1x7,62	1x7,62	1x7,62
автоматический гранатомет, мм	–	40	–
ПТРК	Milan-2Т	опция	Tow-2
<b>СУО</b>			
упрощенное	–	–	
танкового типа	+	+	+
панорамический прибор наблюдения	+		–
Тепловизионные прицельные приборы	+	+	+
Дистанционно-управляемый боевой модуль	–	+	–
С <sup>4</sup> Г	–	+	+
<i>Примечание</i>			

Наименование	Rookat	Centauro	Piranha III LAV-III	Stryker
Год начала производства	1989	1991	1998,1999	2001
Экипаж, чел (ОУ+БО+ДО)	1+3+0	1+3+0	1+2+8	2+0+9
Боевая масса, кг	28 000	25 000	18 500	18 700
Удельная мощность, л.с./т	20,0 (20,1)	20,8	21,6	21,4
Удельное давление на грунт, кг/см <sup>2</sup>				
Уровень баллистической защиты				
- лоб	4	4	4	4
- борт	3	3	3	3
Защита от РПП	–	–	–	–
Уровень противоминной защиты			2a/3б	2a/3б
Модульная легкоъемная конструкция бронезащиты	–	–	+	+
Система предупреждения о лазерном облучении	–	+	+	+
<b>Вооружение</b>				
пушка, мм	76 или 105	105	25мм M242 30мм	–
бронепробиваемость, мм/0 <sup>0</sup> /1000м			66	
пулемет, мм	2x7,62	2x7,62	1x7,62	12,7 и 7,62
автоматический гранатомет, мм	–	–	–	40 мм
ПТРК	–	–	–	javelin
<b>СУО</b>				
упрощенное	–	–	–	–
танкового типа	+	+	+	+
панорамический прибор наблюдения	–	+	–	–
Тепловизионные прицельные приборы	–	+	+	+
Дистанционно-управляемый боевой мо- дуль	–	–	+	+
С <sup>4</sup> І	–	–	опция	–
Примечание				

Продолжение таблицы 9

<b>Наименование</b>	<b>AMV XC-360P</b>	<b>Stryker</b>	<b>Pandur II</b>	<b>VBCI</b>
Год начала производства	2002	2003	2004	2004
Экипаж, чел (ОУ+БО+ДО)	1+2+9	2+9	1+2+8	2+1+8
Боевая масса, кг	22 000	22 940	22 500	28 000
Удельная мощность, л.с./т	15,2	17,4	20,0	19,6
Удельное давление на грунт, кг/см <sup>2</sup>				
Уровень баллистической защиты				
- лоб	5	5	5	5
- борт	3	4	3	4
Защита от РПГ	–	–	–	+(ДЗ)
Уровень противоминной защиты	1а/3б 3а/3б (ЮАР)	2а/3б	3а/3б	
Модульная легкоъемная конструкция бронезащиты	+	+	+	+
Система предупреждения о лазерном облучении	–	+	+	–
<b>Вооружение</b>				
пушка, мм	30/40мм M44	–	30мм МК30-2	25мм M811
бронепробиваемость, мм/0 <sup>0</sup> /1000м	120/140	–	120	85
пулемет, мм	1x7,62	12,7/7,62	1x7,62	1x7,62
автоматический гранатомет,мм	–	40	–	–
ПТРК	–	javelin	–	опция
<b>СУО</b>				
упрощенное	–	–	–	–
танкового типа	+	+	+	+
панорамический прибор наблюдения	–	–	–	+
Тепловизионные прицельные приборы	+	+	+	+
Дистанционно-управляемый боевой мо- дуль	опция +	+	опция +	+
С <sup>4</sup> Г	–	+	+	+
<i>Примечание</i>	<i>Дистанционно- управляемые боевые модули: - PML127OWS с 12,7 НСВ - Protector с 12,7 М2НВ - HitRole с 40 гранатомет</i>			



Рисунок 2 – Marder-1



Рисунок 3 – Bradley M2

Кроме перечисленных доработок примененного подхода по определению приоритетов по степени рациональности, следует отметить и то, что полученные рациональные характеристики, не вполне соответствуют существующим тенденциям в развитии ЛК и Г ББМ за 10–15 лет. Так, например, в наше время на вооружении гусеничных боевых машин установлены 30–40 мм малокалиберные автоматические пушки, а получено в результате экспертной оценки рациональное значение 100 мм, бронепробиваемость составляет 40–60 мм, а получено 450 мм, что не согласуется с современными тенденциями развития ЛК и Г ББМ.

По-видимому, это связано с тем, что не проводился отбор экспертов по уровню значимости их ответов и уровню квалификации, в результате чего были получены приближенные данные при опросе. Все опрашиваемые эксперты сотрудники одной организации, что соответственно сформировало в их представлении машину с такими значениями показателей ТТХ.

В целом следует отметить, что анализ приоритетов для ЛК и Г ББМ проведенный методом сравнения по степени рациональности приемлем, и при условии устранения выявленных недостатков на тестовом этапе, позволит не только проводить анализ ТТХ машин, но и прогнозировать ожидаемые направления развития ЛК и Г ББМ.

#### Литература

1. Анипко О.Б., Борисюк М.Д., Климов В.Ф. Техническая термодинамика и теплопередача в компактных теплообменниках транспортных машин; Монография Анипко О.Б., Борисюк М.Д., Климов В.Ф. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2006. – 244 с.
2. Анипко О.Б. Рациональные теплообменные поверхности. – Харьков: ХВУ, 1998. –187 с.
3. Никольский М.В., Ильин В.Е., Колесная бронетехника. – М.: "Издательство Астрель", 2001. –511 с.
4. Анфилатов В.С., Емельянов А.А, Кукушки А.А. Системный анализ в управлении: Учебное пособие / – М.: "Финансы и статистика", 2003. – 368 с.
5. Анипко О.Б. Принципы разработки рациональных теплообменных аппаратов; // Збірник наукових праць ХІВПС ім. І. Кожедуба –2003. –1(9). – С. 33–39.
6. Анипко О.Б., Логинов В.В. Оценка технического совершенства и рыночной привлекательности объекта авиационной техники по степени рациональности // Інтегровані технології та енергозбереження. –2006. – №2. – С. 140–148.

#### Bibliography (transliterated)

1. Anipko O.B., Borisyuk M.D., Klimov V.F. Tehnicheskaya termodinamika i teploperedacha v kompaktnyih teploobmennikah transportnyih mashin; Monografiya Anipko O.B., Borisyuk M.D., Klimov V.F. – Harkov: NTU "HPI", 2006. – 244 p.
2. Anipko O.B. Ratsionalnyie teploobmennyye poverhnosti. – Harkov: HVU, 1998. – 187 p.
3. Nikolskiy M.V., Ilin V.E., Kolesnaya bronetehnika. – M.: "Izdatelstvo Astrel", 2001. –511 p.
4. Anfilatov V.S., Emelyanov A.A, Kukushki A.A. Sistemnyiy analiz v upravlenii: Uchebnoe posobie – M.: "Finansyi i statistika", 2003. – 368 p.
5. Anipko O.B. Printsipyi razrabotki ratsionalnyih teploobmennyyih apparatov; Zbirnik naukovih prats HIVPS im. I. Kozheduba –2003. –1(9). – p. 33–39.

6. Anipko O.B., Loginov V.V. Otsenka tehničeskogo sovershenstva i ryinochnoy prevlekatelnosti ob'ekta aviatsionnoy tehniki po stepeni ratsionalnosti Integrovani tehnologii i ta energozberezheniya. –2006. – #2. – p. 140–148.

УДК 623.4.016

Аніпко О.Б., Рікунов О.М., Бусяк Ю.М.

**АНАЛІЗ ЗМІНИ ПРІОРИТЕТІВ ЛЕГКИХ БОЙОВИХ КОЛІСНИХ  
ТА ГУСЕНІЧНИХ МАШИН**

Визначені раціональні значення показників ТТХ бойових машин. Проведено порівняння формули пріоритетів бойових машин, отриманої методом порівняння по ступеню раціональності та інтуїтивно.



УДК 621.45.02

Алпатов В.Е., Анипко О.Б., Логинов В.В.

**ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО СОВЕРШЕНСТВА СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ И ЕЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ***ОАО "Мотор Сич", г. Запорожье**Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба*

Эффективность вновь создаваемого или модернизированного объекта авиационной техники (ОАТ), его соответствие мировым стандартам могут быть оценены путем сопоставления его технико-экономических характеристик с достигнутым уровнем этих характеристик на мировом уровне [1–4]. Для объектов авиационной техники комплексная оценка конкурентоспособности может производиться по уровню их технического и экономического совершенства [2].

Эталоном для сравнения и оценки могут служить либо технико-экономические характеристики, выведенные по данным статистики в среднем по наиболее передовым из современных конструкций ОАТ данного класса, либо показатели наиболее совершенных в технико-экономическом отношении отдельных типов ОАТ. В данной статье в качестве ОАТ для сравнения и оценки технико-экономического уровня выбрана авиационная силовая установка [3, 4].

В настоящее время для оценки эффективности применения силовой установки (СУ) на летательном аппарате (ЛА) используются многие параметры, характеристики, показатели и критерии [5]. Проблема интеграции характеристик элементов ЛА заключается в получении максимальной (или минимальной) величины целевой функции, критерия или показателя эффективности, позволяющего судить о степени технико-экономического совершенства ЛА.

Характеристики конкретных типов двигателей отличаются по техническим и экономическим показателям, что связано с назначением ЛА и, соответственно, двигателя. В зависимости от особенностей ЛА, на котором устанавливается исследуемый двигатель, сравнение и оценка его характеристик относительно мирового уровня может производиться с привлечением показателей, связанных с весом снаряженного самолета, расходом топлива, продолжительностью полета [4].

Дальнейшее обеспечение соответствия требуемому уровню осуществляется путем модификации узлов и элементов ОАТ, которая проводится обычно после того, как новый тип отработал 7–9 лет, т.е. примерно на середине его срока службы (установка более совершенных двигателей, вставки в фюзеляж для увеличения пассажироместимости, замена старого оборудования более совершенным и др.).

Одним из основных способов модернизации ОАТ есть замена авиационного двигателя. Однако выбор двигателя является сложной задачей, так как не всегда удается удовлетворить все многообразие требований к параметрам и характеристикам ЛА.

Кроме технических показателей на первый план выходят и экономические показатели, которые определяют эксплуатационные затраты. Экономичность ЛА определяется техническим совершенством конструкции, уровнем использования техники, ценами, сроками службы и другими нормативами, которые в ряде случаев зависят не от ЛТХ конструкции, а от условий производства (общая серийность выпуска) и эксплуатации (степень освоенности, определяемая продолжительностью нахождения объекта в

эксплуатации). Поэтому рациональная интеграция СУ и ЛА представляет собой комплексную проблему.

Объективная оценка технико-экономического совершенства и экономической эффективности ОАТ и сравнение его с другим, близким по типу, могут быть произведены только на сопоставимой основе по доведенной конструкции, общей серийности производства и освоенности в эксплуатации [6–9]. Между тем, на этапах параметрических исследований и проектирования основные исходные данные, необходимые для определения экономической эффективности (цены, сроки службы, ресурс двигателя и др.), как правило, неизвестны. Эти показатели при сравнительной оценке должны основываться на статистике и прогнозах о средних за весь срок жизни объекта стоимостных и нормативных показателях, получение которых затруднительно.

Все это требует разработки регулярных подходов, позволяющих оценить конкурентоспособность существующих и перспективных ОАТ.

Для оценки конкурентоспособности двигателя разработан подход, который включает определение технического и экономического совершенства СУ. Разработан метод сравнительной оценки объектов авиационной техники по степени рациональности, который является информативным и достаточным для анализа вкладов отдельных подсистем в сложную техническую систему [8, 9]. Сформированы группы параметров, по которым можно детализировать уровень разработки отдельных элементов силовой установки.

С помощью разработанной модели и методики сравнительной оценки и прогнозирования конкурентоспособности ОАТ может быть произведена как абсолютная оценка, когда известны фактические или установленные в плановом порядке исходные нормативные данные, так и сравнительная – по стандартным или осредненным данным [9].

Поэтому в основу сравнительной методики положены следующие основные принципы:

1. Сравнение между собой подлежат ОАТ одинакового типа, т.е. близкие по значениям определяющих параметров и характеристик.
2. Методика в каждом конкретном случае учитывает конструктивные и технологические особенности ОАТ, характерные для современных объектов данного типа.
3. Методика позволяет задавать стоимостные, экономические, ресурсные, технические и другие показатели и нормативы. А в случае отсутствия таковых – задается значение показателя, рекомендуемое с точки зрения рационального (предельного) значения для данного объекта с экспертным назначением его числового или качественного уровня.

Разработанный подход реализован в виде программного комплекса, который включает в себя блоки: исходных данных (рис. 1), рациональных параметров и характеристик, определения зависимостей искомых значений параметров, статистических данных, расчетный модуль и отчеты.

Кроме сравнения по полным показателям технического и экономического совершенства в целом, подход позволяет оценить вклады отдельных компонентов сложной технической системы и ее характеристик для выработки решений о направлении работ по повышению степени технического и экономического совершенства.

Для проверки работоспособности аналитического модульного комплекса проведен предварительный расчет параметров, характеристик и комплексных показателей. В качестве ОАТ выбрано 4 двигателя разных поколений: Д-18Т 1 серии, Д-36 серии 4А, Д-436-148, АИ-22.



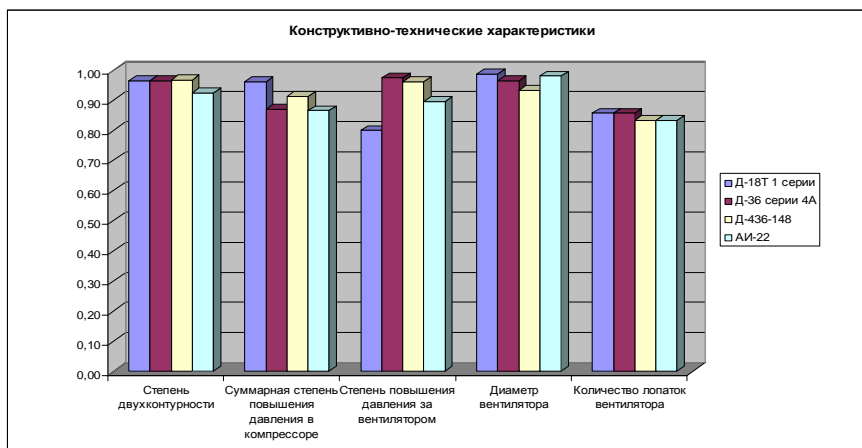


Рисунок 3 – Вклад конструктивно-технических характеристик в степень технического совершенства ОАТ

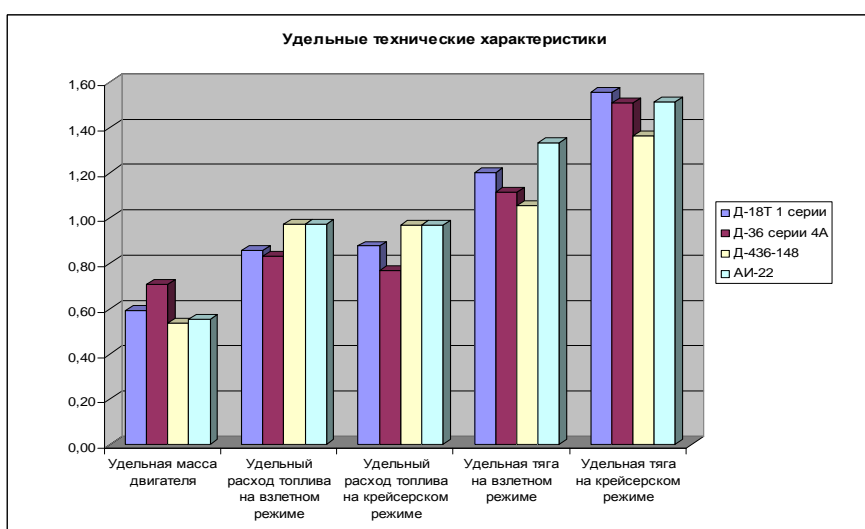


Рисунок 4 – Вклад удельных характеристик в степень технического совершенства ОАТ

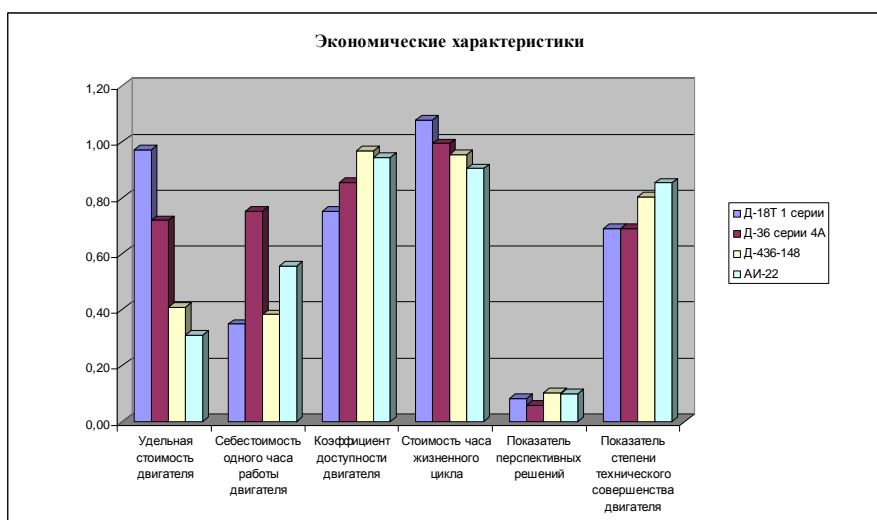


Рисунок 5 – Вклады экономических характеристик

Из предварительных результатов анализа параметров и комплексных показателей видно, что наибольшую степень технического совершенства имеет двигатель АИ-22, несмотря на то, что у него самый низкий ресурс по сравнению с остальными. По характеристикам технического совершенства на втором месте двигатель Д-436-148. Но наряду с этим, наибольшее значение комплексного показателя экономического совершенства имеет двигатель Д-36 серии 4А.

Однако одной из проблем для практического применения этой методики является формирование общей базы данных рациональных характеристик двигателей данного поколения. Эта проблема связана с подбором экспертов и их весомости. Кроме того, необходимо проводить непрерывный мониторинг тенденций развития авиационной техники, что требует больших финансовых затрат и времени на анализ большого объема информации.

#### Литература

1. Ломакин В.К. Мировая экономика. – М., 2000. – 324 с.
2. Семенов К.А. Международные экономические отношения. – М., 2000. – 404 с.
3. Теория авиационных двигателей / Под редакцией Ю.Н. Нечаева. – М.: Машиностроение. – 1984. – 864 с.
4. Терещенко Ю.М., Мітрахович М.М. Авіаційні газотурбінні двигуни. К.: КВЦ, 2001. – 312 с.
5. Флоров И.Ф. Методы оценки эффективности применения двигателей в авиации // Труды ЦИАМ. – № 1099. – 1985. – 260 с.
6. Анипко О.Б. Рациональные теплообменные поверхности. Харьков.: ХВУ, 1998. – 186 с.
7. Товажнянский Л.Л., Анипко О.Б. Метод сравнения транспортных теплообменных аппаратов по степени рациональности // Інтегровані технології та енергозбереження. – №1. – 1999. – С. 64–69.
8. Анипко О.Б., Борисюк М.Д., Климов В.Ф. Техническая термодинамика и теплопередача в компактных теплообменниках транспортных машин. Монография. Х.: НТУ “ХПИ”. – 2006. – 248 с.
9. Анипко О.Б., Логинов В.В. Оценка технического совершенства и рыночной привлекательности объекта авиационной техники по степени рациональности. // Інтегровані технології та енергозбереження. – №2. – 2006. – С. 145–152.

#### Bibliography (transliterated)

1. Lomakin V.K. Mirovaya ekonomika. – M., 2000. – 324 p.
2. Semenov K.A. Mezhdunarodnyie ekonomicheskie otnosheniya. – M., 2000. – 404p.
3. Teoriya aviatsionnyih dvigateley Pod redaktsiey Yu.N. Nechaeva. – M.: Mashinostroenie. – 1984. – 864 p.
4. Tereschenko Yu.M., MItrahovich M.M. AvIatsIynI gazoturbinni dviguni. K.: KVITs, 2001. – 312 p.
5. Florov I.F. Metody otsenki effektivnosti primeneniya dvigateley v aviatsii Trudyi TsIAM. – # 1099. – 1985. – 260 p.
6. Anipko O.B. Ratsionalnyie teploobmennyye poverhnosti. Harkov.: HVU, 1998. – 186 p.

7. Tovazhnyanskiy L.L., Anipko O.B. Metod sravneniya transportnyih teploobmenniyh apparatov po stepeni ratsionalnosti Integrovani tehnologiyi ta energozberezheniya. – #1. – 1999. – p. 64–69.

8. Anipko O.B., Borisyuk M.D., Klimov V.F. Tehnicheskaya termodinamika i teploperedacha v kompaktnyih teploobmennikah transportnyih mashin. Monografiya. H.: NTU “НПІ”. – 2006. – 248 p.

9. Anipko O.B., Loginov V.V. Otsenka tehniceskogo sovershenstva i ryinochnoy privlekatelnosti ob'ekta aviatsionnoy tehniki po stepeni ratsionalnosti. Integrovani tehnologiyi ta energozberezheniya. – #2. – 2006. – p. 145–152.

УДК 621.45.02

Алпатов В.С., Аніпко О.Б., Логінов В.В.

### **ОЦІНКА СТУПЕНІ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОЇ ДОСКОНАЛОСТІ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ ТА ЇЇ КОНКУРЕНТОЗДІБНОСТІ**

Для оцінки конкурентоздібності двигуна розроблений підхід, що включає визначення технічної та економічної досконалості силової установки. Розроблено метод порівняльної оцінки об'єктів авіаційної техніки по ступені раціональності, що є інформативним і достатнім для аналізу внесків окремих підсистем у складну технічну систему. Сформовано групи параметрів, по яких можна деталізувати рівень розробки окремих елементів силової установки.

Розроблений підхід реалізований у вигляді програмного комплексу. Наведено результати попередніх досліджень.

УДК 658.26.011.47:664-02:6

Бурдо О.Г., Семков С.В., Сталимбовская А.С.

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПИЩЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ***Одесская национальная академия пищевых технологий*

В мире в производстве полезно используется только 1/3 сырья. Поэтому, проблема ресурсосбережения является глобальной. Энергетическая мощность мирового производства удваивается каждые 12 лет, а объем промышленного производства – каждые 15 лет. За последние десятилетия промышленная нагрузка на окружающую среду выросла в 2,5...3 раза. Дефицит энергии в мире растет. Базельский манифест, принятый в рамках Всемирного конгресса «Мир и справедливость» (1989 г.), установил ограничение всей первичной энергии на одного жителя 3 тоннами каменного угля, т.е. 88 ГДж. За последнее столетие потребление энергии в мире выросло в 25 раз и составляет в индустриально развитых странах 300 ГДж на одного жителя (рис. 1). Можно прогнозировать и дальнейший стремительный рост энергопотребления.

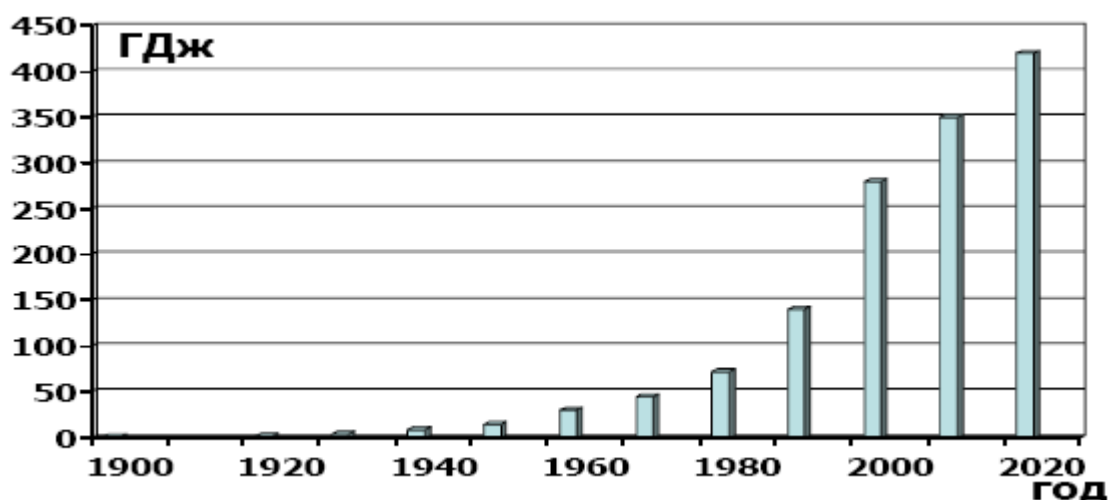


Рисунок 1 – Динамика потребления энергии одним жителем в индустриально развитой стране

При серьезном снижении запасов топлива это может привести к глобальной катастрофе, если не изменить отношение к наиболее дефицитному ресурсу на Земле – к энергии.

Независимая Украина из энергообеспеченной, но энергорасточительной быстро превратилась в энергодефицитную, но осталась энергорасточительной. Украина резко окунулась в проблему дефицита энергии. В результате – энергетический кризис. С нарастанием остроты энергетического кризиса повышается значимость проблемы эффективного использования основного и наиболее дефицитного для Украины ресурса – топлива. Более того, Украина взяла на себя ряд международных энергетических и экологических обязательств, подписав Европейскую энергетическую хартию (1991 г.), Рамковую конвенцию ООН об изменении климата (1992 г.), Киотский протокол (1997 г.), утвердивший «Берлинский мандат», планирующий снизить уровень выбросов на 7,5 % к 2005 г., и на 15 % к 2010 г.

Энергетическая политика Украины базируется на этих документах и на сегодняшних энергетических проблемах в стране. Принятое направление – энергосбережение. Население, производители продукции и услуг привыкли к расточительному отношению к энергии и за последнее десятилетие, как это ни парадоксально, удельные затраты энергии в экономике страны выросли. Представляется, что сама концепция энергетической политики Украины имеет изъяны [1,2]. Украинец еще не привык к тому, что энергия – это товар, эффективное использование которого дает прибыль, а расточительное – сделает банкротом. Мы по-прежнему боремся за "энергосбережение", а не энергетическую эффективность. В чем суть этих двух понятий? Приемы «энергосбережения» – это нормирование расходов энергии, регламентирование ее потребления, планирование снижения ее расхода и отключение потребителей при дефиците энергии. Предельный рубеж энергосбережения – нулевое потребление энергии, достичь его можно выключением рубильника электросети и закрытием задвижки на газопроводе. Такой подход, вполне оправданный при социалистическом способе хозяйствования и низкой стоимости энергоносителей, не приемлем в условиях капиталистической экономики. Вопрос этот не в терминологии, а в отношении к самому дорогому для Украины ресурсу – к энергии. Неоправданно низкие цены на энергоносители в прошлом сформировали пренебрежительное отношение к энергии, которое до сих пор доминирует в стране. Поэтому, и у населения, и у производителей, и у первых руководителей регионов и страны отсутствует современная европейская культура энергопользования. Нам всем необходимо признать, что энергия – это дорогой ресурс, который следует грамотно и профессионально использовать.

Украина – страна парадоксов, наиболее серьезные из которых относятся к энергетической сфере [1]. При острейшем дефиците энергии в Украине практически отсутствует культура энергопользования. В Украине проживает около 1 % населения планеты, а привыкли мы потреблять более 2 % энергии, используемой в мире. При этом Украина является энергодефицитной страной, а уровень комфортности нашей жизни соответствует уровню слаборазвитых стран. Имея крайне ограниченную добычу собственного природного газа, украинец лидирует по объему его сжигания, уступая только россиянам, англичанам и американцам. При этом ощущается острый дефицит топлива в коммунально-бытовой сфере, на транспорте, в промышленности. А по уровню развития Украине отводится 91 место в мире.

Из национального бюджета Украины 40 % расходуется на закупку энергоносителей, даже 20 % бюджета нам не хватает на решения задачи теплоснабжения. Веерные отключения от энергоснабжения стали нормой в нашей стране. Отношение Правительства Украины к проблеме энергоэффективности серьезное. Один из первых законов независимой Украины – закон «Об энергосбережении». Создан Госкомитет Украины по энергосбережению и соответствующие подразделения в отраслевых министерствах и ведомствах. Утверждены Национальная, комплексная государственная, отраслевые и региональные программы по энергосбережению. Однако, удельные затраты энергии в промышленной сфере росли.

Украина располагает мощным научно-техническим потенциалом, способном решать сложнейшие энерготехнологические проблемы, а на большинстве предприятий не умеют провести элементарный анализ потребления энергии, не знают, как учесть её расход, не знакомы с простейшими методами повышения энергетической эффективности. Энергорасточительность, теневая экономика привели к тому, что энергоёмкость экономики Украины в 3...4 раз выше, чем в развитых странах (табл. 1).



При острейшем дефиците энергии в Украине практически полностью отсутствует культура энергопользования, и, что самое удивительное, ее не спешат прививать населению.

Таблица 1 – Энергетическая статистика

СТРАНА	НАСЕЛЕНИЕ, млн. чел.	Энергоемкость ВВП, кг н. э. / дол. США
Беларусь	9,97	0,35
Германия	82,34	0,18
Дания	5,36	0,14
Польша	38,64	0,26
Россия	144,75	0,67
США	285,91	0,25
Украина	49,09	0,72
Франция	60,91	0,19
Япония	127,21	0,17
Чехия	10,26	0,3

Образование в сфере энергетической эффективности, предусмотренное программой министерства образования и науки Украины, остается формальным.

Производства продовольствия являются энергоемкими технологиями. Так, в индустриально развитых странах эффективность использования энергии при производстве продуктов питания не превышает 10 % (рис. 2).

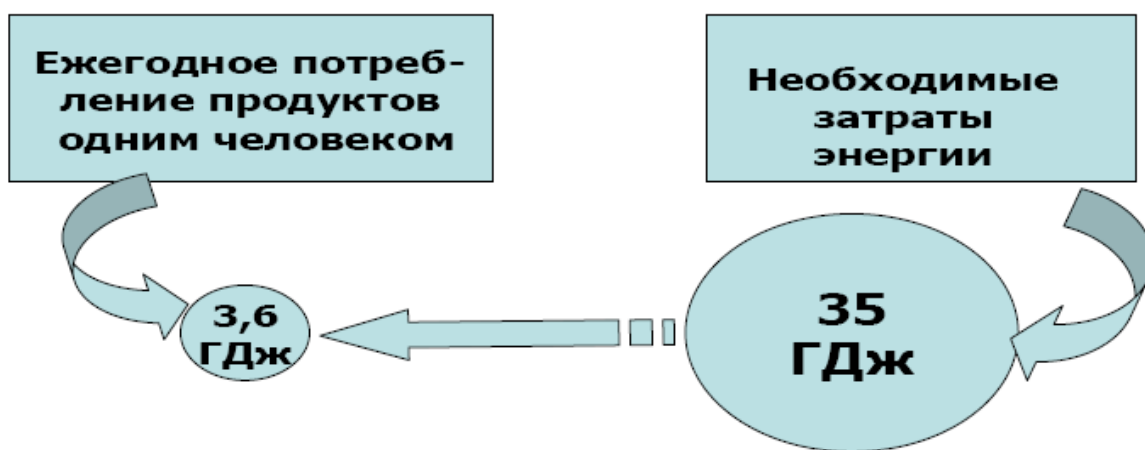


Рисунок 2 – Энергия в продовольственной цепочке

Агропромышленный комплекс Украины потребляет до 20 % энергетических ресурсов страны и является одним из наиболее крупных их потребителей. Здесь особенно остро проявились противоречия между высокими ценами на топливо и крайне низкой культурой использования электроэнергии, топлива, пара. Энергетическая составляющая в себестоимости пищевых продуктов в Украине в 4 раза выше, чем в индустриально развитых странах. Удельные энергетические затраты в производственной сфере за годы независимости выросли на 45 %. Начиная с 1998 г. наблюдается медленное снижение этого показателя. Однако, темпы этого снижения не могут удовлетворять. При

сохранении тенденций уровень 1992 г. можно достигнуть только через 5...7 лет [2,3]. Переход на новые экономические условия обозначил острое противоречие на пищевых производствах. Можно выделить три основных общих причины роста удельного энергопотребления. Первая – стремительно достигшие мирового уровня цены при расчете за энергоносители с одной стороны, и отсутствие культуры энергопользования, тепло-технологии, принципиально рассчитанные на потребление дешевых энергетических ресурсов, с другой. Вторая причина – существенное снижение объема выпускаемой на крупных предприятиях продукции, усугубленное ее перераспределением среди многочисленных мини-предприятий отличающихся повышенной энергоемкостью. В результате нарушено соответствие потребности в энергии с производительностью централизованных систем энергоснабжения, их эффективностью. Третья причина – динамичное развитие в Украине теневой экономики, которая занимает лидирующие позиции в Европе. Уже всем понятно, что единственным путем выхода из энергетического кризиса является перевод экономики на путь энергетической эффективности. Представляется, что эти вопросы в Украине, в АПК следует рассматривать не в связи с приходом зимы, а еженедельно, ежедневно и оперативно принимать обоснованные решения. В основе стратегии повышения энергетической эффективности АПК можно выделить два приоритетных направления: подготовка кадров и внедрение современных технологий энергомониторинга. По первому направлению требуется подготовка специалистов – энергоменеджеров и обучение служащих предприятия. Энергоменеджеров лучше готовить из числа экономистов с хорошим техническим образованием.

Современные технологии энергомониторинга предполагают организацию центров или групп и диагностику предприятия по уровню потребления ресурсов. На первом этапе осуществляется энергетическая ревизия, цель которой получить общую информацию об уровне расхода всех видов ресурсов, оценить удельные затраты энергии на выпуск продукции. Такой анализ позволит провести соответствующее ранжирование по энергоемкости, определить имеющийся общий потенциал энергоэффективности, оценить остроту проблемы. Результатом такой работы являются нормы потребления энергоносителей и энергетический паспорт предприятия.

На втором этапе проводится энергетическое обследование линии, цеха, предприятия. По сути, это декомпозиция системы, выделение наиболее энергоемких объектов. С помощью комплектов мобильных измерителей проводится регистрация токовых нагрузок, температур, влагосодержания и расходов теплоносителей, температурного поля корпусов оборудования. Анализ пароконденсатных, электрических и тепловых балансов устанавливает структуру энергетических потерь. В результате работы определяется карта потерь энергии и карта возможных потребителей низкопотенциальных тепловых сбросов. Такие карты являются основанием для разработки программы повышения энергетической эффективности предприятия. Рекомендуется в программе предусмотреть несколько этапов. На первом этапе планируется выполнение беззатратных и малозатратных проектов. Во-первых, это ликвидации прямых утечек пара, газа, воды. Эффект от реализации этих простых задач часто бывает неожиданным. Потери ресурсов сокращаются до 80 %. Во-вторых, это организационно-технические проекты, из которых на первый план выходят задачи совершенствования режима «разогрев – работа – остановка» и согласование номинальной мощности генерирующих систем с потребителем. Объединяет эти задачи общая причина: сокращение объема выпуска продукции. В результате – расход энергии на разогрев оборудования становится ощутимым в общем балансе. А работа парогенераторов на пониженных мощностях приводит к снижению КПД, т.е. к перерасходу топлива.

Важным моментом программы является максимально возможное привлечение механизмов самофинансирования проектов. Доходы от малозатратных проектов первого этапа инвестируются в проекты второго этапа. Здесь планируются работы по установке дополнительных счетчиков расхода ресурсов, модернизация тепловой изоляции, установка теплоутилизаторов и т.п. Естественно, эти проекты требуют материальных затрат. Но, часть из них поступят как прибыль из первого этапа, часть в виде инвестиций. Следовательно, проекты должны быть четко экономически обоснованы, приоритеты отдаются задачам, гарантирующим большую прибыль при меньшем периоде окупаемости.

Третий этап программы – это серьезные инвестиционные проекты, которые направлены на создание современных систем энергетического мониторинга. Это компьютеризация сбора данных по основным параметрам работы предприятия, анализа большой базы данных. Такие системы дают возможность оперативно влиять на ход производственной деятельности, использовать для выпуска продукции минимально возможное количество ресурсов.

Высокая энергоемкость технологий приводит к тому, что пищевые высококачественные продукты, изготовленные в Украине, неконкурентоспособны на мировом рынке. Ясно, что, если не предпринимать экстренных мер, то продукция украинских производителей пищевых продуктов будет вытеснена и с отечественного рынка. Вместе с тем, именно продукция АПК способна быстро наполнять государственный бюджет, она характеризуется постоянным спросом, отечественные технологии и сырье, как правило, гарантируют высокие пищевые качества готовых продуктов. Одним из основных их недостатков является высокая энергоемкость.

Однако, высокая энергоемкость производства предполагает, что есть огромные резервы по повышению энергоэффективности, есть разнообразные пути решения задач. Общий принцип на этом этапе такой: сделать так, как уже сделали в мире. Иллюстрировать это можно «законом пирамиды» (рис. 3).

Видно, что чем больше значение потенциала энергосбережения (П), тем больше есть технических решений, которые при незначительных инвестициях (И) дадут прибыль и имеют малый срок окупаемости (С).

В Европе в производстве очень низкое значение (П), они находятся у основания пирамиды, однако, считают, что инвестировать энергосбережение целесообразно.

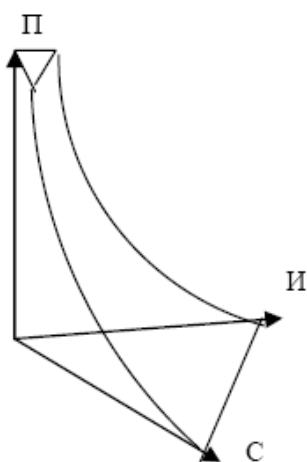


Рисунок 3 – Закон пирамиды

Сегодня уже очевидно, что единственный путь к конкурентоспособности украинских продуктов на мировом рынке – это повышение энергоэффективности. Мы находимся у вершины пирамиды (рис. 3), поэтому инвестиции в энергоэффективность становятся самыми выгодными инвестициями в АПК.

В условиях энергетического кризиса проблема эффективного использования энергии в пищевых технологиях становится остроактуальной. Во-первых потому, что производство продуктов питания является энергоемким во всех развитых странах. Во-вторых, являясь одним из основных потребителей топливно-энергетических ресурсов, предприятия агропромышленной сферы лидируют по объему неиспользуемых вторичных энергетических ресурсов. Большое разнообразие термического оборудования, сосредоточенного на многих заводах, отличающихся спецификой, мощностью не создавало предпосылок для внедрения энергосберегающих технологий, отработанных в других областях промышленности. Пищевая отрасль консервативна в вопросах внедрения прогрессивных технических решений в области энерготехнологий. Энергетическое расточительство при производстве продуктов питания усугубляет энергетический кризис, поскольку спад производства в пищевых отраслях ниже, чем по промышленности в целом.

В сложившейся сложной ситуации нужно внимательно проанализировать мировой опыт. Известно, что острый энергетический кризис охватил развитые страны Европы и США в 70-е годы. Им удалось достаточно быстро решить возникшие проблемы во многом благодаря новому подходу, новой науке – энергетическому менеджменту. Энергетический менеджмент – это инженерный метод, основанный на структурном анализе потребления энергетических ресурсов и системном подходе к выработке экономически обоснованных решений. Метод сосредотачивает внимание на развитии мотивации снижения расхода энергии, проведении серьезных энергетических исследований объектов с последующим обоснованием приоритетных путей внедрения проектов, формированием программы этапного повышения энергетической эффективности. Причем, такие долгосрочные программы должны быть как для отдельных объектов, так и для всего предприятия, отрасли в целом. А в основе этих программ должны лежать результаты энергетической ревизии, аудита, исследований.

Директивным государственным службам по энергосбережению, погрузившимся в клубок своих организационных проблем, пока не удалось создать ни условий мотивации, ни механизмов стимулирования практической реализации программ энергосбережения на предприятиях. Да и вряд ли возможно ожидать результатов от старых подходов в новых экономических условиях. Вероятно, искать пути снижения энергоемкости следует непосредственно на местах, самими потребителями. Энергетическая эффективность должна превратиться в решающий фактор удовлетворения потребностей АПК в топливно-энергетических ресурсах. Предприятиям АПК следует разобраться в экономической эффективности различных проектов, представлять приоритетные этапы.

Значительный диапазон значений по возможной экономии топливно-энергетических ресурсов связан с особенностями объектов, их индивидуальностью и подтверждает обязательную необходимость энергетических обследований.

При одесской национальной академии пищевых технологий создана консалтинговая лаборатория «ТЭРМА», которая в комплексе решает задачи по повышению культуры энергопользования и эффективности энерготехнологий. Разработанные в «ТЭРМА» научно-методологические основы использованы при проведении энергоаудита и выработке программ повышения эффективности использования энергии на заводах региона. КЛ «ТЭРМА» ищет принципиально новые подходы для повышения энергоэф-

фективности пищевых технологий. Кроме решения оперативных задач, КЛ “ТЭРМА” предлагает принципиально новые аппараты для повышения энергоэффективности пищевых технологий. Некоторые из них уже апробированы на предприятиях региона.

Проводятся как серьезные теоретические разработки в области энергетической эффективности, так и прикладные исследования по созданию принципиально новых, энергоэффективных подходов при изготовлении оборудования пищевых производств. В области фундаментальных исследований разработаны:

1. Теория сопряженных процессов гидродинамики, теплопереноса паропылегазового потока в пучках оребренных труб [4...7]. В основе теории сформулированы гипотезы предельного равновесия теплопереноса и межфазового взаимодействия между компонентами потока.

2. Теория кристаллизации из пищевых растворов на стержневых и игольчатых испарителях. Доказана справедливость гипотез термического парадокса снижения сопротивления в системе «раствор – блок льда» в процессе вымораживания и возможности обоснования критических значений конструктивных и режимных параметров по числу БИО [7,9].

3. Теория теплообмена неньютоновских жидкостей и дисперсных материалов в аппаратах с испарительно-конденсационными модулями [8]. Основана на гипотезе о возможности воздействия на пограничный слой вязкого и дисперсного продукта самим теплопередающим модулем.

4. Теория комбинированных процессов нано- и микропереноса при сушке и экстрагировании. Сформулирована гипотеза о возможности инициирования мощного бародиффузионного потока из твердой фазы продукта с помощью импульсного электромагнитного поля [10,11].

Результаты теоретических исследований легли в основу прикладных разработок в области энергоэффективного оборудования для различных технологий пищевых производств.

Системы комплексной утилизации теплоты и пыли из аэрозольных выбросов основана на использовании оригинального аппарата – тепломаассоутилизатора. В конструкции применены высокоэффективные теплопроводы-термосифоны [3]. Система внедрена на зерносушильной установке ДСП-32, в линии пресс-сушильных автоматов сахарно-рафинадного производства, в линии получения растворимого кофе. Аппарат экономит 12...25 % топлива, улавливает 90...99 % пыли из сушильного агента. Эффект в аппарате достигается за счет противоточного движения сред при поперечном обтекании пучка оребренных труб, предельно низкого термического сопротивления термосифонов, достижением практически изотермичности поверхностей теплопередачи. Извлекает из газовых выбросов при сушке пищевых продуктов от 40 до 99 % пыли продукта, снижает расход пара либо топлива на 10–25 %. Тепловая мощность модуля из 200 термосифонов 0,1...0,5 МВт. Срок окупаемости 0,5...2 года [5–6].

В ОНАПТ в настоящее время создается современная лаборатория энергетического мониторинга. В лаборатории реализуется уникальный проект, суть которого в том, что впервые в Украине элементы строений и инженерных сетей выполняют не только свои штатные задачи, но и используются для проведения исследований. Приборы отопления, освещения, окна, стены обвязаны датчиками и измерительными приборами и слушатели на них определяют реальные технические и экономические показатели элементов строений и систем обеспечения. Оснащение лаборатории проводится лучшими фирмами Одессы, которые владеют современными энергоэффективными технологиями.

Поэтапное решение проблем энергоэффективности в АПК позволит высококачественным украинским продуктам стать конкурентоспособными на мировом рынке.

Литература

1. Бурдо О.Г. Энергетический консалтинг в АПК южного региона // ЭСТА 2001, Вып. 1–2, С. 70–74 .
2. Бурдо О.Г., Захаров Н.Д. Стратегия повышения энергетической эффективности АПК // Интегрированные технологии и энергосбережение 2003, №2 – С. 18–22.
3. Бурдо О.Г. Энергоэкономические аспекты развития перерабатывающей отрасли АПК // Зернові продукти і комбікорми, 2001 – № 4. – С. 58–60.
4. Бурдо О.Г., Станевский О.Л., Айда Амор. Burdo O.G., Terziev S.G., Peretyaka S.N. Energy – Saving Food Technologies om Heat Pipe Exgchangers Basis. // Proc. 9 th Int.Heat Pipe Conf. Albukierk. USA. 1995 –V.1. – P. 219–224
5. Тепломассоперенос аэрозольных потоков в термосифонных пучках // Труды Межд. Форума по тепломассобмену.– Т.10., – Минск. 2000. – С. 179–183.
6. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Перетяка С.Н. Тепломассоперенос в утилизаторах теплоты паропылегазовых выбросов пищевых производств // Труды Межд. Форума по тепломассобмену. –Т.10., –Минск. 1996. –С. 173–178.
7. Burdo O.G., Gajda S., Knuish A.I. Heat aerodynamics reliability of the heat pipe exchangers // Proc. 10-th Int. Heat Pipe conf.– Stuttgart (Germany).– 1997.– P. 101–106.
8. Burdo O.G., Kovalenko E.A., Stanevsky O.L. Heat pipes in the processes and apparatyses of food productions // 3-th Int. Seminar “Heat Pipe, Heat Pumps, Refrigerators”, September, 15–18, 1997.– Minsk, Belarus.– P. 130–134.
9. Бурдо О.Г. Наномасштабные эффекты в пищевых технологиях // Инженерно физический журнал (НАН Беларусь). 2005. Т78, №1, с. 88–93
10. Бурдо О.Г., Рыбина О.Б., Сталимбовская А.С. Энергетическая эффективность пищевых нанотехнологий // Интегрированные технологии и энергосбережение 2006, № 2 – С. 7–12.
11. Burdo O.G., Terziev S.G., Zikov A.V. Optimization of Heat Pipes and Mass Recovery // 5-th Int. Seminar “Heat Pipe, Heat Pumps, Refrigerators”, September, 8–11, 2003.– Minsk, Belarus.– P.161–166.

Bibliography (transliterated)

1. Burdo O.G. Energeticheskiy konsalting v APK yuzhnogo regiona ESTA 2001, Vyip. 1–2, p. 70–74 .
2. Burdo O.G., Zaharov N.D. Strategiya povysheniya energeticheskoy effektivnosti APK Integrirrovannyye tehnologii i energosberezhenie 2003, #2 – p. 18–22.
3. Burdo O.G. Energoekonomicheskie aspektyi razvitiya pererabatyivayushey otrasli APK Zernovi produkti i kombikormi, 2001 – # 4. – p. 58–60.
4. Burdo O.G., Stanevskiy O.L., Ayda Amor. Burdo O.G., Terziev S.G., Peretyaka S.N. Energy – Saving Food Technologies om Heat Pipe Exgchangers Basis. Proc. 9 th Int.Heat Pipe Conf. Albukierk. USA. 1995 –V.1. – P. 219–224
5. Teplomassoperenos aerazolnyih potokov v termosifonnyih puchkah Trudyi Mezhd. Foruma po teplomassobmenu.– T.10., – Minsk. 2000. – i. 179–183.

6. Burdo O.G., Terziev S.G., Peretyaka S.N. Teplomassoperenos v utilizatorah teploty i paropyilegazovyih vyibrosov pischevyih proizvodstv Trudyi Mezhd. Foruma po teplomassobmenu. –Т.10., –Minsk. 1996. –p. 173–178.

7. Burdo O.G., Gajda S., Knuish A.I. Heat aerodynamics reliability of the heat pipe exchangers Proc. 10-th Int. Heat Pipe conf.– Stuttgart (Germany).– 1997.– P. 101–106.

8. Burdo O.G., Kovalenko E.A., Stanevsky O.L. Heat pipes in the processes and apparatuses of food productions 3-th Int. Seminar “Heat Pipe, Heat Pumps, Refrigerators”, September, 15-18, 1997.- Minsk, Belarus.- P. 130-134.

9. Burdo O.G. Nanomasshtabnyie efektyi v pischevyih tehnologiyah Inzhenerno fizicheskiy zhurnal (NAN Belarus). 2005. T78, #1, p. 88–93

10. Burdo O.G., Ryibina O.B., Stalimbovskaya A.S. Energeticheskaya effektivnost pischevyih nanotehnologiy Integrirovannyye tehnologii i energosberezhenie 2006, # 2 – p. 7–12.

11. Burdo O.G., Terziev S.G., Zykov A.V. Optimization of Heat Pipes and Mass Recovery 5-th Int. Seminar “Heat Pipe, Heat Pumps, Refrigerators”, September, 8-11, 2003.- Minsk, Belarus.- P.161-166.

УДК 658.26.011.47:664-02:6

Бурдо О.Г., Семков С.В., Сталімбовська Г.С.

## **ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МОНІТОРИНГ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

*Одеська національна академія харчових технологій*

Приведено аналіз енергетичних проблем у світі, Україні, в АПК. Визначена специфіка енерготехнологій АПК. Пропонується стратегія рішення питань енергетичної ефективності в АПК. Наведено досвід роботи академії із проблем підвищення ефективності використання ресурсів у харчових технологіях.

УДК 621.45.02.024:05.054

Анипко О.Б., Логинов В.В.

**КОЭФФИЦИЕНТ ИНТЕГРАЦИИ ДЛЯ АНАЛИЗА СТЕПЕНИ ТЕХНИЧЕСКОГО  
СОВЕРШЕНСТВА КОНСТРУКТИВНО-КОМПОНОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ  
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА***Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба*

Современный летательный аппарат (ЛА) представляет собой сложную техническую систему с развитой иерархической структурой, большим числом элементов и внутренних связей. Подсистемы самолета взаимосвязаны и взаимообусловлены с точки зрения рабочих процессов, происходящих в полете. В последнее время широкое применение находят схемы ЛА, основанные на интеграции крыла, фюзеляжа, силовой установки (СУ), систем управления и устойчивости с целью достижения максимальной эффективности [1–6].

Рассматривая ЛА как сложную техническую систему можно выделить следующие этапы интеграции планера и СУ: параметрическая, критериальная, конструктивная, технологическая [7,8]. Из рассмотренных этапов интеграции ЛА и СУ большой интерес представляет критериальная интеграция, поскольку она наиболее информативно позволяет оценить летно-технические и экономические характеристики ЛА на предварительных этапах создания объекта авиационной техники.

В настоящее время для оценки эффективности применения СУ на ЛА используются многие параметры, характеристики и критерии [1,4,6]. Проблема интеграции характеристик элементов ЛА заключается в получении максимальной (или минимальной) некоторой целевой функции, критерия или показателя эффективности, позволяющего судить о степени технико-экономического совершенства ЛА. Выбор такого критерия является сложной задачей, так как не всегда удается все многообразие параметров и характеристик СУ и ЛА свести к одному или хотя бы нескольким показателям.

При определении летно-технических и экономических характеристик ЛА используются параметры элементов планера и силовой установки, которые изменяются в зависимости от режимов полета самолета и работы двигателя [3,5]. В качестве искомым величин выделяются параметры с помощью которых можно выразить аэродинамические и летно-технические характеристики ЛА.

Так, для силовой установки важной величиной является эффективная тяга  $P_{с.у.эф.}$ , под которой понимается разность между суммарной тягой собственно двигателей  $\sum P_{дв}$  и аэродинамическим сопротивлением силовой установки  $X_{с.у.}$ :

$$P_{с.у.эф.} = \sum P_{дв} - X_{с.у.} .$$

Понятие эффективной тяги позволяет разделить аэродинамическое сопротивление самолета на сопротивление планера и силовой установки [6]:

$$X_{сам} = X_{пл} + X_{с.у.} .$$

Для оценки степени аэродинамического совершенства и согласованности режимов работы элементов силовой установки (воздухозаборник, двигатель и сопло) ис-



пользуют понятия эффективной тяги силовой установки и эффективного удельного расхода топлива:

$$P_{\text{эф}}^F = P_{\text{вн}}^F (1 - \Delta \bar{P}_{\text{эф}});$$

$$C_{\text{уд эф}} = \frac{C_{\text{уд.вн}} P_{\text{вн}}^F}{P_{\text{эф}}^F} = \frac{C_{\text{уд.вн}}}{1 - \Delta \bar{P}_{\text{эф}}},$$

где  $P_{\text{эф}}^F$  – эффективная лобовая тяга;  $P_{\text{вн}}^F$  – внутренняя лобовая тяга;  $\Delta \bar{P}_{\text{эф}} = \frac{X_{\text{с.у}}}{F_{\text{с.у}} P}$  – коэффициент, характеризующий долю тяги двигателя, которая затрачивается на преодоление лобового сопротивления силовой установки;  $F_{\text{с.у}}$  – суммарная площадь входного сечения двигателей;  $C_{\text{уд.эф}}$  и  $C_{\text{уд.вн}}$  – эффективный и внутренний расходы топлива.

В качестве критерия оценки эффективности двигателя на начальном этапе проектирования самолета [5] используют понятия теоретической дальности и условной дальности крейсерского полета

$$L_{\text{теор}} = \frac{V_{\text{крейс}} K_{\text{пл}}}{C_{\text{уд}}} \ln \frac{1}{\bar{m}_{\text{пл}} + \bar{m}_{\text{сy}} + \bar{m}_{\text{п.нагр.}}};$$

$$L_{\text{усл}} = \frac{V_{\text{крейс}} K_{\text{пл}}}{C_{\text{уд.эф}}},$$

где  $K_{\text{пл}} = \frac{K_{\text{сам}}}{1 - \Delta \bar{P}_{\text{эф}}}$  – аэродинамическое качество планера;  $V_{\text{крейс}}$  – крейсерская скорость полета;  $\bar{m}_{\text{пл}}$  – относительная масса планера ЛА;  $\bar{m}_{\text{сy}}$  – относительная масса силовой установки;  $\bar{m}_{\text{п.нагр.}}$  – относительная масса полезной нагрузки.

Мерой топливной экономичности самолета в целом может служить величина километрового расхода топлива  $q$ , представляющая собой затраты топлива при перемещении самолета на один километр пути

$$q = \frac{P \cdot C_{\text{уд}}}{V},$$

где  $P \cdot C_{\text{уд}}$  – часовой расход топлива;  $V$  – скорость полета ЛА.

В тех случаях, когда дальность полета и масса полезной нагрузки заданы и превышение их не целесообразно или невозможно, критерием оптимальности может быть взлетная масса самолета  $m_{\text{взл}}$  [5]. Более совершенными критериями оптимальности являются функции, составленные из различных летных данных самолета, например, дальность полета  $L_{\text{пол}}$  многорежимного самолета по комбинированному профилю. Для оценки транспортных самолетов широко применяется величина относительной часовой производительности самолета [6]:

$$\bar{\Pi} = \frac{L_{\text{практ}} m_{\text{ком}}}{t_{\text{рейс}} m_{\text{взл}}} = V_{\text{рейс}} \bar{m}_{\text{ком}},$$

где  $\bar{m}_{\text{ком}}$  – относительная масса коммерческой нагрузки;  $L_{\text{практ}}$  – практическая дальность полета;  $t_{\text{рейс}}$  – время рейсового полета.

Более общим критерием является коэффициент эффективности самолета:

$$k_{\text{эф}} = V_{\text{рейс}} \bar{m}_{\text{ком}} L_{\text{практ}},$$

где  $V_{\text{рейс}}$  – рейсовая скорость полета.

Обоснованное суждение о совершенстве рассматриваемого ЛА можно сделать с помощью критериев [6], основанных на использовании экономических показателей. Одним из наиболее распространенных показателей для оценки гражданских самолетов являются приведенные затраты  $a_{\text{пр}}$ :

$$a_{\text{пр}} = a + a_{\text{к.в}},$$

где  $a = \frac{A}{k_{\text{загр}} m_{\text{ком}} V_{\text{рейс}}}$  – себестоимость перевозки коммерческой нагрузки;  $a_{\text{к.в}}$  – капитальные вложения;  $A$  – стоимость эксплуатации самолета в течение одного летного часа;  $k_{\text{загр}}$  – коэффициент, учитывающий среднюю неполноту загрузки самолета в течение года эксплуатации.

Эффективность маневренных самолетов оценивается с помощью более сложных критериев. В том случае, когда использование этих критериев не оправдано из-за необходимости учета большого числа взаимосвязей, показателями оптимальности решения могут быть критерии, разработанные на основе летных характеристик самолета.

Основным показателем, характеризующим аэродинамическое совершенство планера ЛА есть аэродинамическое качество [9]:

$$K = \frac{C_y}{C_x},$$

где  $C_y$  – коэффициент подъемной силы;  $C_x$  – коэффициент лобового сопротивления самолета.

Однако приведенные показатели и критерии не полно учитывают степень технического совершенства конструктивно-компоновочных решений ЛА на основе тяговых, аэродинамических и геометрических характеристик.

В связи с этим, на основе результатов сравнения различных конструктивно-компоновочных решений ЛА и их двигателей разработан критерий интеграции, сущность которого заключается в определении интегративного свойства ЛА с учетом тяговых, аэродинамических и геометрических характеристик:

$$k_{\text{инт}} = \frac{\left(\frac{P_{\text{дв}}}{m_{\text{ла}}}\right) \cdot F_{\text{мид}}}{S_{\text{нп}} \cdot C_x} = \frac{\left(\frac{P_{\text{дв}}}{m_{\text{ла}}}\right)}{S_{\text{нп}}} \left/ \left(\frac{C_x}{F_{\text{мид}}}\right)\right.,$$

где  $P_{\text{дв}}$  – тяга двигателя;  $m_{\text{ла}}$  – масса ЛА;  $F_{\text{мид}}$  – площадь миделевого сечения ЛА;  $S_{\text{нп}}$  – площадь несущей поверхности планера ЛА;  $C_x$  – коэффициент лобового сопротивления.

Разработанный критерий показывает удельную тягу двигателя (или СУ)

приходящуюся на удельное сопротивление ЛА отнесенное к  $1 \text{ м}^2$  несущей поверхности ЛА (рис. 1).

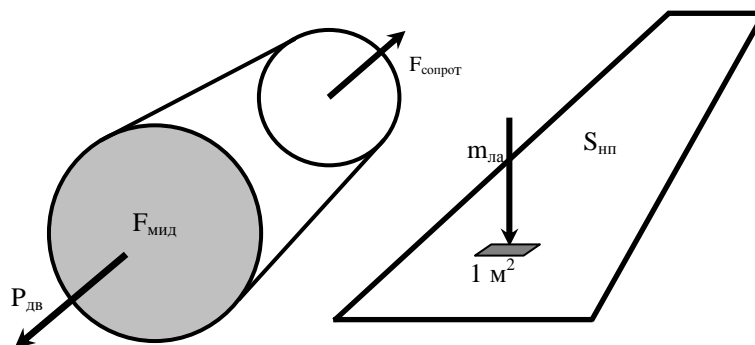


Рисунок 1 – Сущность коэффициента интеграции

Кроме того, для решения комплексной проблемы анализа и синтеза ЛА, как сложной технической системы, авторами разработан иерархический структурированный набор параметров, характеристик и комплексных показателей силовой установки и планера ЛА [8]. С помощью такого подхода производится оценка степени влияния различных параметров и характеристик на комплексные показатели и критерии ЛА как сложной технической системы.

Разработанный критерий применен для сравнительной оценки транспортных и пассажирских ЛА [10]. Самолеты выбраны с разным числом двигателей и распределены по 4 группам: самолеты с 4 ТРД; самолеты с 2 ТРДД; самолеты с 2 ТРДД и 1 ТРД; самолеты с 4 ТРДД.

По приведенным параметрам (табл. 1) [10] рассчитаны основные характеристики и критерий интеграции. Зависимости коэффициента интеграции от характеристик двигателя и планера ЛА показаны на рис. 2–5. Зависимости аэродинамического качества ЛА от характеристик двигателя и планера показаны на рис. 6–9.

Предложенный коэффициент интеграции чувствителен к конструктивно-компоновочным решениям, а именно к числу двигателей на ЛА. Из анализа приведенных зависимостей (рис. 2–5) можно сделать вывод о том, что для всех исследуемых ЛА можно выделить характерные диапазоны значений критерия интеграции. Так, для ЛА с 4 ТРД  $0,39 \leq k_{\text{инт}} \leq 0,65$ ; с 2 ТРДД  $3,36 \leq k_{\text{инт}} \leq 6,69$ ; с 2 ТРДД и 1 ТРД  $2,12 \leq k_{\text{инт}} \leq 3,0$ ; с 4 ТРДД  $1,11 \leq k_{\text{инт}} \leq 2,02$ .

Из приведенных зависимостей аэродинамического качества от геометрических параметров ЛА (рис. 6–9) видно, что для всех конструктивно-компоновочных решений ЛА с разным числом двигателей отмечается наличие минимального значения площади миделя ЛА при характерном значении аэродинамического качества. Интерес представляет тот факт, что с установкой на ЛА двухконтурных двигателей аэродинамическое качество ЛА находится почти в одном диапазоне. Так, для самолетов с 4 ТРД  $4 \leq K_{\text{ЛА}} \leq 11$ ; для самолетов с 2 ТРДД  $12 \leq K_{\text{ЛА}} \leq 17$ ; для самолетов с 2 ТРДД и 1 ТРД  $13 \leq K_{\text{ЛА}} \leq 17$ ; для самолетов с 4 ТРДД  $14 \leq K_{\text{ЛА}} \leq 22$ .

Для всех конструктивно-компоновочных решений ЛА (рис. 6–9) отмечается очевидная закономерность – чем больше количество двигателей и их диаметр входного сечения, тем больше площадь миделевого сечения ЛА. Так, для самолетов с 4 ТРД  $7,5 \leq S_{\text{мид}} \leq 12,8$ ; для самолетов с 2 ТРДД  $8 \leq S_{\text{мид}} \leq 25$ ; для самолетов с 2 ТРДД и 1 ТРД  $10,8 \leq S_{\text{мид}} \leq 30$ ; для самолетов с 4 ТРДД  $12 \leq S_{\text{мид}} \leq 40$ . Но с увеличением площади миделевого сечения возрастает значение аэродинамического качества ЛА.



















В целом, критерий интеграции носит общий характер и учитывает основные характеристики силовой установки и ЛА. Этот критерий можно использовать как для прямого определения характеристик ЛА, так и наоборот, задавшись этим критерием, можно определять параметры ЛА как единой технической системы.

Таким образом, из приведенных результатов можно сделать вывод о том, что разработанный критерий интеграции, чувствительный к количеству силовых установок на ЛА. Он позволяет оценивать степень технического совершенства ЛА на этапах предварительных проработок. Данный критерий, в общем, достаточно объективно характеризует степень технического совершенства конструктивно-компоновочного решения ЛА как единой технической системы.

#### Литература

1. Работы ведущих авиационных двигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей / Под общей редакцией В.А. Скибина. – М.: ЦИАМ, 2004. – 254 с.
2. Иностранные авиационные двигатели / Под ред. Л.И. Соркина. – М.: ЦИАМ, 13 издание. – 2000. – 203 с.
3. Нечаев Ю.Н. Теория авиационных двигателей. –М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1990. –878 с.
4. Югов О.К., Селиванов О.Д. Согласование характеристик самолета и двигателя. –М.: Машиностроение, 1980. – 200 с.
5. Югов О.К., Селиванов О.Д., Дружинин Л.Н. Оптимальное управление силовой установкой самолета. – М.: Машиностроение, 1978. – 204 с.
6. Югов О.К., Селиванов О.Д. Основы интеграции самолета и двигателя.– М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
7. Анипко О.Б., Логинов В.В. Интеграция силовой установки и планера как комплексная проблема синтеза летательного аппарата // Интегрированные технологии и энергосбережение, №1. – 2007. – С. 47–52.
8. Анипко О.Б., Логинов В.В., Зубарев В.В. К вопросу о рациональном диапазоне параметров авиационной силовой установки // Збірник наукових праць НАКУ ім. М.Є. Жуковського "ХАІ" "Вопросы проектирования и производства конструкций ЛА", выпуск №1(52), 2007. – С. 68–72.
9. Кюхеман Д. Аэродинамическое проектирование самолетов. – М.: Машиностроение, 1983. – 656 с.
10. Статистические данные зарубежных пассажирских самолетов (по данным иностранной печати). ЦАГИ. Обзор №601. – 1981. – 240 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Raboty veduschih aviatsionnyih dvigatelestroitelnyih kompaniy po sozdaniyu perspektivnyih aviatsionnyih dvigateley Pod obschey redaktsiey V.A. Skibina. – М.: TsIAM, 2004. – 254 p.
2. Inostrannyye aviatsionnyie dvigateli Pod red. L.I. Sorkina. – М.: TsIAM, 13 izdanie. – 2000. – 203 p.
3. Nechaev Yu.N. Teoriya aviatsionnyih dvigateley. –М.: VVIA im. N.E. Zhukovskogo, 1990. –878 s.
4. Yugov O.K., Selivanov O.D. Soglasovanie harakteristik samoleta i dvigatelya. –М.: Mashinostroenie, 1980. – 200 p.
5. Yugov O.K., Selivanov O.D., Druzhinin L.N. Optimalnoe upravlenie silovoy ustanovkoy samoleta. – М.: Mashinostroenie, 1978. – 204 p.

6. Yugov O.K., Selivanov O.D. Osnovy integratsii samoleta i dvigatelya.– М.: Mashinostroenie, 1989. – 304 p.

7. Anipko O.B., Loginov V.V. Integratsiya silovoy ustanovki i planera kak kompleksnaya problema sinteza letatel'nogo aparata Integrirovannyye tehnologii i energosberezhenie, #1. – 2007. – p. 47–52.

8. Anipko O.B., Loginov V.V., Zubarev V.V. K voprosu o ratsionalnom diapazone parametrov aviatsionnoy silovoy ustanovki Zbirnik naukovih prats NAKU im. M.E. Zhukovskogo "НАІ" "Voprosyi proektirovaniya i proizvodstva konstruktsiy LA", vyipusk #1(52), 2007. – p. 68–72.

9. Kyuheman D. Aerodinamicheskoe proektirovanie samoletov. – М.: Mashinostroenie, 1983. – 656 p.

10. Statisticheskie dannyye zarubezhnyih passazhirskih samoletov (po dannym inostrannoy pechati). TsAGI. Obzor #601. – 1981. – 240 p.

УДК 621.45.02.024:05.054

Аніпко О.Б., Логінов В.В.

**КОЕФІЦІЄНТ ІНТЕГРАЦІЇ ДЛЯ АНАЛІЗУ СТУПЕНІ ТЕХНІЧНОЇ  
ДОСКОНАЛОСТІ КОНСТРУКТИВНО-КОМПОНУВАЛЬНИХ РІШЕНЬ  
ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ**

*Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба*

Розроблено критерій інтеграції, який визначає ступень технічної досконалості ЛА з урахуванням тягових, аеродинамічних та геометричних характеристик. Даний критерій дозволяє оцінювати технічну досконалість ЛА на етапах попередніх проробок і характеризує досконалість конструктивно-компонувального рішення ЛА як єдиної технічної системи.

УДК 678.5

Рассоха А.Н., Черкашина А.Н.

**ВЛАГОПОГЛОЩЕНИЕ ФУРАНО-ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ  
С АКТИВИРОВАННЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ**

Действие воды на полимерные композиты (ПКМ) строительного назначения многообразно по своему характеру. Вода является неперенным компонентом внешней среды, воздействующей на ПКМ, в условиях эксплуатации. Поэтому стойкость к воздействию влаги для создаваемых композитов строительного назначения является одним из главных параметров их работоспособности и долговечности.

Процесс диффузии влаги в фурановых и фурано-эпоксидных ПКМ условно можно разделить на несколько составляющих:

1. Молекулы воды, диффундирующие в полимерную матрицу, способствуют снижению межмолекулярного взаимодействия макромолекул или их фрагментов, вызывая пластифицирующий эффект. Побочным эффектом пластификации может быть растворение и вынос некоторых компонентов ПКМ (в фурано-эпоксидных системах - аминоксодержащих структурирующих агентов, катализаторов структурирования фурановой компоненты - хлоридов алюминия или железа и др.) в водную среду. Кроме этого, возможно также проявление химических процессов взаимодействия полимерной матрицы с водой (например, гидролиз с участием фрагмента макромолекулы, содержащей связь  $-C=N-$ ).

2. Диффундирующие в ПКМ молекулы воды, локализуются на границе раздела фаз "полимерная матрица - дисперсный наполнитель", в межфазном слое. В результате адсорбции воды в межфазном слое (МФС) нарушается прочность адгезионного контакта, проявляется пластифицирующий эффект, образуются микротрещины в областях, прилегающих к зоне контакта "полимер-наполнитель". Это является, как правило, основной причиной существенного и необратимого снижения физико-механических характеристик ПКМ строительного назначения, а, следовательно, значительного сокращения гарантированного срока эксплуатации изделий и систем из данных ПКМ.

Сорбция воды в ПКМ с жестким, непористым наполнителем, не сорбирующим влагу (к этой группе относятся кварцевый песок и кварцевая мука, каолин, периклаз) характеризуется, в основном, сорбцией воды полимерной матрицей и структурной пористостью ПКМ. Эти параметры могут изменяться при варьировании температуры окружающей среды, в результате процессов "старения" (возникновение трещин и пор усадочного характера, химические реакции с участием воды, вымывание низкомолекулярных фракций и др.).

Представляло интерес исследовать влияние модификации поверхности кварцевого песка (КП) путем совместного его помола с катализатором структурирования фурфурилиденацетонов (компонента фурано-эпоксидного олигомера – ФАЭД) хлоридами алюминия, железа, кобальта, а также поверхностной обработке используемого дисперсного наполнителя выбранными полиацеталями (поливинилбутираль – ПВБ, поливинилбутиральфурфураль – ПВБФ, поливинилэтинал – ПВЭ) на стойкость композитов к действию влаги.

Предварительный анализ сорбции влаги структурированными ненаполненными полимерными системами показал, что время установления равновесного влагосодержания  $\tau_p$  при фиксированной температуре существенно зависит от толщины образца – с

увеличением толщины  $\tau_p$  растет, предельное влагопоглощение  $w_\infty$ , зависит от размеров образца и термической предыстории. Процесс сорбции влаги с достаточной степенью точности и достоверности может быть рассмотрен в рамках одномерной диффузии, описываемый уравнением Фика

По методу групповых вкладов для фурановых, эпоксидных материалов в исходном (монофурфурилиденацетон – МФА, дифурфурфурилиденацетон – ДИФА, мономер ФАМ, эпоксидный олигомер – ЭО, ФАЭД) и в структурированном (отвердители ДЭТА, Агидол АФ-2, полиэтиленполиами ПЭПА) состоянии проведена оценка теоретической изотермы адсорбции. Предполагалось, что каждая полярная группа или фрагмент молекулы (количество  $N$ ), входящих в состав ингредиентов исследованных материалов, сорбирует влагу согласно гидратному числу при известной молекулярной массе повторяющегося звена  $M$  (г/моль).

Вначале определяли равновесное влагосодержание в каждом ингредиенте системы  $w_\infty^{расч.}$ , а затем с учетом массового содержания проводилась оценка сорбционной емкости материалов в целом (табл. 1).

Сорбционной способностью по отношению к воде обладают: в фурановых ингредиентах – фрагмент фуранового кольца –**О-**, кетогруппа **С=О**; в эпоксидных – эфирная группа –**О-**, гидроксильная –**ОН**, фениленовый фрагмент –**С<sub>6</sub>Н<sub>4</sub>-**; в структурированных системах – иминогруппа –**NH-** (ДЭТА, Агидол АФ-2), гидроксильная –**ОН**, фениленовый фрагмент –**С<sub>6</sub>Н<sub>4</sub>-** (Агидол АФ-2).

Таблица 1 – Влагосодержание фурановых, эпоксидных и фурано-эпоксидных материалов

Материал	M, г/моль	N	$w_\infty^{расч.}$ (г/100 г) при $p/p_s$		$w_\infty^{расч.}$ стр/ $w_\infty^{расч.}$ олиг при $p/p_s$	
			0,7	1,0	0,7	1,0
МФА	128	2	1,687	5,625	-	-
ДИФА	214	3	1,262	4,206	-	-
ФАМ	188	2,7	1,389	4,632	-	-
МФА+ДЭТА	162	2	8,555	12,222	5,071	2,173
ДИФА+ДЭТА	240	3	5,925	9,0	4,695	2,140
ФАМ+ДЭТА	217	2,7	6,714	9,967	4,834	2,152
МФА+АФ-2	268	4	10,229	20,854	6,063	3,707
ДИФА+АФ-2	348	5	7,981	16,578	4,731	2,947
ФАМ+АФ-2	324	4,7	8,665	17,861	6,231	3,857
ЭО (ЭД-20)	340	6	0,455	2,171	-	-
ЭО+ДЭТА	738	13	9,371	22,933	20,595	10,563
ЭО+АФ-2	831	15	9,946	24,747	21,859	11,399
ФАЭД-20	218	3,37	1,202	4,140	-	-
ФАЭД-50	264	4,35	0,922	3,401	-	-
ФАЭД-20+ДЭТА	321	4,76	7,245	12,560	6,027	3,034
ФАЭД-50+ДЭТА	477	4,85	8,964	16,449	9,722	4,837
ФАЭД-20+АФ-2	425	6,76	8,921	19,240	7,422	4,359
ФАЭД-50+АФ-2	577	9,85	9,305	21,303	10,092	6,264

Примечание: относительная влажность эксплуатационной среды  $p/p_s = 0,7$  (воздух),  $p/p_s = 1,0$  (водная среда).

В табл. 2 приведены экспериментальные данные параметров сорбции фурановых и фурано-эпоксидных материалов как в исходном, так и в модифицированном состоянии (модификаторы: каменноугольная смола – КУС, госсиполовая смола – ГС, низкомолекулярный полиизобутилен – НМПИБ, битум – БН). Отвердители – ПЭПА, Агидол АФ-2 и аминофенольные агенты УП-583Д и УП-583 Т.

Таблица 2 – Параметры сорбции фурановых и фурано-эпоксидных полимеров

Материал	$w_{\infty}$ , %	$\tau_p$ , сут	$D \cdot 10^{13}$ , м <sup>2</sup> /с	$S$ , кг/м <sup>3</sup>	$P \cdot 10^{13}$ , Кг/мс
ФАМ+АФ-2	0,85	300	1,05	10,88	11,42
ФАМ+ПЭПА	1,15	310	1,15	13,44	15,46
ФАЭД-20(20)+АФ-2	0,95	320	1,13	11,68	13,20
ФАЭД-50(20)+АФ-2	1,25	280	1,85	15,31	28,32
ФАЭД-20(16)+АФ-2	0,87	300	1,43	10,70	15,30
ФАЭД-50(16)+АФ-2	1,20	280	1,65	14,70	24,25
ФАЭД-20(22)+АФ-2	0,90	290	1,58	11,07	17,49
ФАЭД-50(22)+АФ-2	1,28	275	1,93	15,68	30,26
ФАЭД-20(20)+ПЭПА	1,25	300	1,75	14,14	24,74
ФАЭД-50(20)+ПЭПА	1,42	290	2,15	17,39	37,39
ФАЭД-50(20)+УП-583Д	1,20	280	1,80	14,25	25,65
ФАЭД-50(20)+УП-583Т	1,22	280	1,82	15,05	27,39
ФАЭД-50(20)+ КУС+АФ-2	1,10	220	1,42	13,47	19,13
ФАЭД-50(20)+ ГС+АФ-2	1,30	260	1,73	15,92	27,55
ФАЭД-50(20)+НМПИБ+АФ-2	1,15	240	1,54	14,03	21,61
ФАЭД-50(20)+БН+АФ-2	1,20	260	1,68	14,70	24,70
ФЭО-20(20)+АФ-2	0,75	170	0,58	9,90	5,74
ФЭО-50(20)+АФ-2	1,05	190	0,95	13,65	12,97

Сопоставительный анализ расчетного количества сорбируемой влаги (табл. 1) и экспериментальных значений равновесного влагопоглощения (табл. 2) показал, что для всех исследованных систем теоретически рассчитанный параметр сорбции существенно превышает полученное при эксперименте значение этой характеристики. При этом очевиден факт, что чем больше полярных групп имеется в анализируемой системе, тем выше сорбционное сродство к материалу (табл. 1). Однако различие между теоретической оценкой и экспериментальными данными можно объяснить различной доступностью фрагментов молекул системы, а также наличием надмолекулярных образований в стеклообразных полимерах (глобулы), в которых упорядоченные структурные элементы менее доступны для влаги, но на их поверхности и в межглобулярной зоне полярные группы активно взаимодействуют с молекулами воды.

В первом приближении по данным сорбции влаги можно оценить объем зоны упорядочения в структуре материала:  $w^{эксн} = w_{\infty}^{расч} \cdot (1 - \varphi)$ , где  $\varphi$  – объемная доля зон с упорядоченной структурой. Для системы ФАЭД-50(20)+ ДЭТА(ПЭПА)  $\varphi$  составил примерно 91,37 %, для системы ФАЭД-20(50)+АФ-2 – 94,13 %, что качественно согласуется с теоретическими положениями.

Влагопоглощение фурано-эпоксидных материалов имеет сложный характер и в общем виде определяется массопереносом воды в образец (прямой процесс) и встреч-



ным диффузионным потоком, включающий поток воздуха, захваченным структурой в процессе формирования материала, и водорастворимые или частично водорастворимые компоненты материала из объема и межфазного слоя композита (обратный процесс).

На основании анализа полученных экспериментальных и расчетно-теоретических данных можно сделать вывод о том, что повышение равновесного влагосодержания фурано-эпоксидных композитов при введении в полимерную матрицу дисперсных наполнителей связано, главным образом с изменением структуры и свойств полимера в МФС. При этом дефектность структуры материала (наличие пор) оказывает определенное влияние на  $w_{\infty}$ , однако оно существенно меньше влияния МФС.

Представляло интерес для наполненных фурано-эпоксидных систем проанализировать влияние частиц дисперсной фазы («эффект композита») на процесс сорбции влаги, не описываемый уравнением Фика (процесс нефиковской сорбции), который определяли как разность между влагопоглощением композиционного материала и полимерного связующего в блоке, %/кг (табл. 3):

$$dw_c = \frac{\Delta(\Delta w)_c - \Delta(\Delta w)_m}{\rho_c \cdot V_o} = dc_c - (1 - \mu_f) \cdot \frac{\rho_c}{\rho_m} \cdot dc_m.$$

Таблица 3 – Разность между количеством влаги в композите и полимерной матрице

Материал	$w_{\infty}^c - w_{\infty}^m$ , %	$(w_{\infty}^c - w_{\infty}^m)/m$ , $10^{-3}$ , %/кг	$(w_{\infty}^c - w_{\infty}^m)/ \Delta\tau_p $ , $10^{-5}$ , %/сут
ФАЭД-50(20)+АФ-2+КП	0,70	1,40	1,167
ФАЭД-50(20)+АФ-2+КПА	0,35	0,70	1,750
ФАЭД-50(20)+АФ-2+КПЖ	0,45	0,90	2,250
ФАЭД-50(20)+АФ-2+КПК	0,60	1,20	1,200
ФАЭД-50(20)+АФ-2+КП(ПВБ)	0,50	1,00	1,111
ФАЭД-50(20)+АФ-2+КП(ПВБФ)	0,33	0,66	-
ФАЭД-50(20)+АФ-2+КП(ПВЭ)	0,50	1,00	2,500
ФЭО-50(20)+АФ-2+КП	0,63	1,26	0,262
ФЭО-50(20)+АФ-2+КПА	0,38	0,76	0,181
ФЭО-50(20)+АФ-2+КПЖ	0,54	1,08	0,235
ФАЭД-50(20)+АФ-2+КН	1,68	3,36	1,200
ФАЭД-50(20)+АФ-2+ПК	1,09	2,18	0,991

Анализ данных, приведенных в табл. 3, показал, что наблюдается влияние поверхности дисперсной фазы на процесс сорбции влаги в фурано-эпоксидный композит.

Критерий гомотронности Фурье ( $Fo$ ), отражающий временной фактор процесса массопереноса в композитах, оценивали для исследованных материалов по известной формуле:

$$Fo = \frac{D \cdot \tau}{R^2}.$$

В табл. 4 приведены значения критерия Фурье для 14 суток (временной интервал, используемый для определения коэффициента диффузии), 1 года и 10 лет (экономически обоснованный срок эксплуатации защитных покрытий на бетонных и металлических поверхностях).

Таблица 4 – Критерий гомохронности Фурье для некоторых исследованных систем

Материал	Критерий Фурье $Fo$ через			$Fo/Fo_{бет}, 10^{-7}$
	14 сут.	1 год	10 лет	
ФАЭД-50(20)+АФ-2	0,0089	0,2334	2,334	3700
ФАЭД-50(20)+АФ-2+КП	0,0635	1,6577	16,577	26280
ФАЭД-50(20)+АФ-2+КПА	0,0462	1,2061	12,061	19120
ФАЭД-50(20)+АФ-2+КП(ПВБФ)	0,0477	1,2427	12,427	19700
ФАЭД-50(20)+КУС+АФ-2	0,0069	0,1791	1,791	2840
ФЭО-50(20)+АФ-2	0,0046	0,1198	1,198	1100
ФАЭД-50(20)+ГС+АФ-2	0,0084	0,2183	2,183	3470
ФАЭД-50(20)+НМПИБ+АФ-2	0,0075	0,1943	1,943	3100
ФАЭД-50(20)+БН+АФ-2	0,0081	0,2119	2,119	3350
Бетон	24,1920	60,8	6308	-

Для нивелирования градиента влагосодержания в элементах из композитов необходимо в 1100–3700 раз больше времени для ненаполненных систем и в 19100–26500 раз – для материалов, содержащих дисперсный наполнитель (исходный и модифицированный) в сравнении с конструкцией из бетона (при одинаковой толщине элемента). При этом обработка поверхности дисперсного наполнителя как кислотами Льюиса (хлориды алюминия, железа, кобальта), так и полиацетальдами (ПВБ, ПВБФ, ПВЭ) приводит к уменьшению времени выравнивания влагонасыщения по толщине в элементах из полимерных композитов по сравнению с материалом, содержащим немодифицированный кварцевый песок соответственно на 7–37 % и 9,5–33 %.

Равновесное влагосодержание в изделиях из разработанных композитов в условиях постоянного воздействия влаги может наступить через весьма длительный срок (год и более), а при периодическом изменении влагосодержания окружающей среды (эксплуатация на открытых площадках или в грунтах с переменной, в зависимости от сезона, влажностью) этот эффект маловероятен. В результате в тонких элементах из полимерных композитов (покрытия на бетонных и стальных поверхностях, изделия и конструкции с малым размерным сечением – до 10 см) постоянно наблюдается значительный градиент влагосодержания по сечению элемента. В массивных изделиях и конструкциях (толщиной более 10 см) градиент влагосодержания имеет место в поверхностном слое, в глубинных слоях среднее значение влагосодержания остается практически неизменным.

Таким образом, проведенный комплекс исследований процесса диффузии, сорбции и влагопереноса в разработанных фурано-эпоксидных композиционных материалах показал высокую стойкость данных материалов к действию влаги и возможность их использования в качестве объемных композитов и защитных композиционных систем на металлических и стальных поверхностях.

УДК 678.5

Рассоха О.М., Черкашина Г.М.

### **ВОЛОГОПОГЛИНАННЯ ФУРАНО-ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТИВ З АКТИВОВАНИМ НАПОВНЮВАЧЕМ**

В статті наведені розрахунково-теоретичні та експериментальні данні параметрів сорбції та дифузії вологи в фурано-епоксидні композити з активованим наповнювачем.

УДК 624.07

Раковская Н.Х.

**БЕЗБАЛАНСИРНЫЕ МНОГООСНЫЕ АГРЕГАТЫ  
ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА  
В МАШИНОСТРОЕНИИ, СУДОСТРОЕНИИ И РАКЕТНОЙ ТЕХНИКЕ***Международный славянский университет г. Харьков*

Для работ связанных с транспортировкой негабаритных тяжелых и сверхтяжелых грузов, передвижением тяжелых кранов, кран-башен, в технологическом оборудовании ракетно-космической техники, судостроении и судоремонте, работ на плотинах, в горной и металлургической промышленности, на строительстве и т.д. используют специальные тяжелые многоосные агрегаты, передвигающиеся по рельсовому пути.

Широкое применение специальных агрегатов в реализации международных программ, нужд народного хозяйства страны предопределяет широту их эксплуатации и в каждом случае конструктивное решение агрегатов определяет решаемыми функциональными задачами.

Сложность создания и разработки ходовых колес и путей передвижения тяжелых агрегатов обусловлена значительными нагрузками, передаваемыми от ходовых колес на рельсовый путь. Действующие на путь нагрузки превышают статическое давление колес локомотивов более чем в 20 раз [1,2]. Опыт создания ходовой части агрегатов и путей для них со столь высокими нагрузками, не говоря уже о работе в условиях малых радиусов в плане, и в Украине, и за рубежом – небольшой.

Это, в свою очередь, приводит к необходимости постановки и решения задачи контактной прочности ходовых колес тяжелых агрегатов и рельсовых путей, причем решение этих задач должно осуществляться в сопряженной постановке с учетом взаимного влияния воздействия колеса на рельс и рельса на колесо.

Известны многочисленные разработки «контактных» задач но, будучи разобращенными спецификой частных условий, все эти разработки вылились в местные методики, не связанные между собой или даже противоречащие друг другу. Задачи на местное сжатие в каждой области применения развивались обособленно и в результате получены «контактные расчеты зубчатых колес», «контактные расчеты ходовых колес и рельсов», «контактные расчеты подшипников качения» и т.д. [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11].

Эксперименты в области контактных задач проводятся различно. Такие эксперименты, обычно связанные с оценкой износостойкости роликов и разных материалов, при разных нагрузках, при разных соотношениях качения и скольжения, при разных условиях смазки были проведены Трубиным, Серенсом, Грозиным, Вейем, Бакингом, Мерритом и др.

Механика разрушения в контакте сложна и не может быть объяснена только расклинивающим влиянием смазки. Это очевидно особенно тогда, когда мы переходим к сухому контакту, когда перекачивание роликов происходит без смазки [12–15, 16, 17]. Этот случай, представляющий собой интерес при анализе работы ходовых колес на рельсе, освещен в литературе слабее других, и объем посвященных ему экспериментов явно недостаточен. Поэтому соотношения, принятые в практике расчета зубчатых и червячных передач, не могут быть непосредственно перенесены в область сухого кон-

такта [6]. Это относится, по-видимому, и к области подшипников качения [18], где роль смазки иная, чем в зубчатых колесах.

Приведенные соображения делают необходимым накопление экспериментальных данных и уточнение представлений о работе упругих тел в условиях сухого контакта.

Автором проведены испытания роликов при чистом качении и качении со скольжением. Ролики изготавливались двух типов – цилиндрические, шириной 5 мм, и выпуклые, шириной 10 мм, с разными радиусами кривизны контактной поверхности:  $r = 30, 20, 10$  мм.

Ролики изготавливались по партиям из одной поковки и имели твердость НВ = 1800, 2500, 4000, 5000 и 6000. Состояние рабочей поверхности соответствует шероховатости поверхности  $R_a = 0,025$  мк.

Пары роликов при разных нагрузках подвергались испытаниям на протяжении большого числа циклов нагружения. Деформации роликов измерялись на этапах 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 70, 100 тысяч и далее через каждые 100 тысяч циклов нагружения до  $N = 10^7$ , кроме ряда случаев, когда имели место  $N = 10^8 - 10^9$  циклов.

Контактные напряжения определялись по формуле (1) для цилиндрических роликов и (2) для выпуклых роликов [9].

$$\sigma_3 = K \sqrt[3]{PE^2 / R_1^2}, \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от отношения  $R_2 / R_1$ , под  $R_1$  подразумевается большой радиус, под  $R_2$  – меньший;  $P$  – нагрузка ходового колеса;  $E$  – модуль упругости.

$$\sigma_3 = 0,176 \sqrt{PE / BR}, \quad (2)$$

где  $B$  – полезная ширина рельса.

Поведение цилиндрических и выпуклых роликов имеет некоторые особенности, на которых следует остановиться.

После нагружения цилиндрических роликов ширина их начинает быстро увеличиваться. Этот процесс, в зависимости от величины напряжений  $\sigma_3$ , протекает с различной интенсивностью, но через некоторое время устанавливается некоторое равновесное состояние (рис. 1). Из рисунка видно, что начальная ширина роликов  $B = 4,4$  мм через 20000 оборотов увеличивается до 7 мм, через 40000 оборотов – до 7,5 мм, но дальше наблюдается исключительно медленное изменение ширины и можно считать, что при  $N = 50000 - 120000$  ширина примерно одинакова. Эти ролики испытывались под нагрузкой  $P = 6580$  Н, что при  $B = 4,4$  мм и  $E = 2,05 \cdot 10^5$  Н/мм дает  $\sigma_3^H = 52,5$  Н/мм<sup>2</sup>. При начальной твердости НВ = 2000 имеем  $\sigma_3 / \text{НВ} = 2,6$ .

После того, как установилась ширина  $B = 7,5$  мм, расчетные напряжения снизились до  $\sigma_3^H = 400$  Н/мм<sup>2</sup>, при этом  $\sigma_3^k / \text{НВ} \approx 2$ . Увеличив нагрузку до  $P = 7750$  Н, мы получаем  $\sigma_3^H = 58,5$  Н/мм<sup>2</sup> и  $\sigma_3^k = 420$  Н/мм<sup>2</sup>, что дает  $\sigma_3^k / \text{НВ} = 2,1$ . Заметим, что ролики испытывались до  $N = 8,5 \cdot 10^7$  циклов, а ширина роликов  $B = 8,2$  мм установилась уже при  $N = 60000$  циклов.

При испытании роликов (НВ = 3500) под нагрузкой  $P = 4420$  Н начальная ширина 4,3 мм увеличилась при  $N = 2 \cdot 10^4$  до 5,1 мм и осталась неизменной до  $8,7 \cdot 10^7$ . В этом случае  $\sigma_3^H = 443$  Н/мм<sup>2</sup>  $\approx 1,8$  НВ,  $\sigma_3^k = 405$  Н/мм<sup>2</sup> = 1,6 НВ.

Аналогичные испытания охватывают большое число пар роликов. Так как нагрузки и вызываемые ими напряжения велики, то процесс «раздавливания» начинался сразу после включения машины, но наклеп стабилизировал процесс, и, несмотря на очень большие деформации, мы не наблюдали разрушения поверхности после миллионов циклов нагружения.

Если напряжения назначались меньшими, то и ширина роликов устанавливалась ранее и была меньшей.

Характерными в этих испытаниях оказались соотношения между контактными напряжениями, подсчитанными при установившейся ширине роликов, и начальной твердостью материала.

$$\sigma_s / HB = 0,247 - 13 \cdot 10^3 \cdot HB. \quad (3)$$

Эти данные нанесены на рис. 2 и, как видим, примерно отвечают линейной зависимости.

При высоконагруженном состоянии в контакте испытуемых роликов металл получал пластические деформации, и ширина контакта увеличивалась вместе с числом циклов нагружения. Так как нагрузки велики и напряжение  $\sigma_s$  при первом нагружении больше предела текучести, имеем фазу "переменного равновесия", – в этих условиях не приходится говорить о возможности использования зависимостей теории упругости. Но далее, когда равновесие устанавливается, материал можно считать совершенно упругим. В этом случае возможно при нескольких допущениях использовать решение Герца.

На всех цилиндрических роликах на рабочей поверхности наблюдаются дефекты типа микропиттинга, что указывает на усталостное разрушение тонких поверхностных участков от действия циклических контактных нагрузок.

На рабочих поверхностях всех выпуклых роликов питтингообразование не наблюдается, наличие микротрещин не обнаружено.

Ходовые колеса агрегатов, впрочем, как и кранов, локомотивов и т.д. работают в условиях качения при наличии тангенциального усилия и иногда явного скольжения. Имеются в виду приводные колеса, тангенциальные нагрузки которых вызывают упругое, а иногда и видимое скольжение – буксование при разгоне, скольжении, при торможении. В связи с прочностными расчетами ходовых колес тяжелых агрегатов представляет интерес исследование работы роликов при качении со скольжением в условиях сухого трения [9, 12, 14, 17, 19]. Изучению этого вопроса уделялось внимание на протяжении многих лет, однако и в настоящее время он исчерпывающе не освещен.

Поэтому автором были проведены эксперименты с выпуклыми роликами. Для создания высоких напряжений в контакте ролики профилировались в поперечном направлении по радиусам  $r = 10, 15$  и  $20$  мм. Нагрузка на ролики  $P$  варьировалась в пределах от  $0,3$  до  $1,3$  кН, что создавало напряжения в них, близкие к напряжениям в реальных ходовых колесах подвижных агрегатов  $\sigma_s = 200 \dots 500$  Н/мм<sup>2</sup>.

В случае применения роликов одного диаметра (в пределах  $30 \dots 50$  мм) за счет смены зубчатых колес скольжение на роликах составляло  $10, 15$ , и  $20$  %, интерес же для исследования представляли скольжения порядка  $1, 2, 3 \dots 10$  %. Чтобы достичь таких величин скольжения, применялись ролики разных диаметров в паре, например,  $48$  и  $50$  мм или  $46$  и  $50$  мм и т.д.

Величина скольжения  $S$  определялась по формуле

$$S = \frac{V_c}{V}, \quad (4)$$

где  $V_c$  – скорость скольжения;  $V$  – окружная скорость роликов.

Скорость скольжения находится из выражения

$$V_c = \frac{\pi}{60}(n_1 D_1 - n_2 D_2), \quad (5)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – числа оборотов в минуту первого и второго роликов.

Например, пусть ролик диаметром 46 мм имеет  $n_1 = 425$  об/мин, а ролик диаметром 50 мм –  $n_2 = 385$  об/мин. Полученная в эксперименте скорость скольжения

$$V_c = \frac{\pi}{60}(425 \cdot 4,6 - 385 \cdot 5) = 1,57 \text{ м/с}, \quad \text{т.е. в процентах скольжение равно}$$

$$S \% = \frac{V_c - V}{V} \cdot 100 = 1,5 \% , \quad \text{причем } V = \frac{\pi}{60} n_2 D_2 .$$

Измеряя в каждом новые величины крутящего момента от трения  $M_T$  и учитывая что

$$M_T = f \frac{PD^2}{2}, \quad (6)$$

где  $f$  – коэффициент трения, получили

$$f = \frac{2M_T}{PD^2}. \quad (7)$$

Располагая в ходе каждого опыта  $f$  и  $S$  % для фиксированной внешней силы  $P$ , меняя величину скольжения  $S$ , строим график (рис. 3) при различных нагрузках

$$f = (P \cdot 10^{-8} + 0,0005) \cdot S^2 + S \cdot (0,0095 - P \cdot 10^{-6}) + 0,1499 \cdot P \cdot 10^{-0,111}. \quad (8)$$

Из рис. 3 видно наличие минимума, но при увеличении параметра  $S$  ( $f > f_{\min}$ ) коэффициент трения скольжения увеличивается и может стать очень большим.

В проведенных экспериментах изучалось поведение соприкасающихся элементов при циклическом нагружении, формирование поверхностей контакта и соотношение этих поверхностей с «теоретическими», размеры которых могут быть определены с помощью известных зависимостей Герца [9, 20].

Исследование поверхности качения роликов показало, что при высоконапряженном состоянии в контакте возникали пластические деформации, и ширина контакта увеличивалась вместе с числом циклов нагружения. Этот процесс в зависимости от величины напряжений и скольжения протекал с различной интенсивностью. Однако через определенное время устанавливалось некоторое равновесное состояние, интенсивность накопления остаточных деформаций замедлялась, а ширина контактной дорожки роликов стабилизировалась после  $2 \cdot 10^4$  циклов и сохранялась неизменной вплоть до появления питтинга (рис. 1).

При качении роликов каждый цикл нагружения вносил в процесс деформирования контактной дорожки свой вклад – уширяется, изменяется форма «мгновенной» площадки [14, 17, 21, 22]. Соответственно изменяется закон давления на контактной площадке – в контактирующем слое материала развиваются усталостные трещины и это дает основание вести расчеты на прочность по нагружениям на поверхности контакта, хотя при цементации и других видах обработки металла может иметь место сложное напряженное состояние, ответственное за образование трещин под контактной площадкой, – автор не связывает этот момент с оценкой прочности по «глубинным» напряжениям сдвига принятой некоторыми специалистами [22, 23] в расчетах зубчатых колес, ходовых колес и пр. В конкретных расчетах оперируем интегральными параметрами, влияние же неровностей поверхностей может быть учтено корректирующим коэффициентом, как то имеет место при расчетах на прочность при изгибе, кручении. Таким образом, практика контактных расчетов представляется вполне убедительной, чем не исключаются дополнительные исследования специальных случаев контакта.

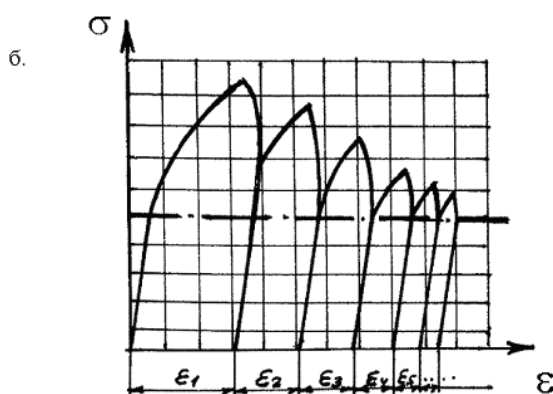
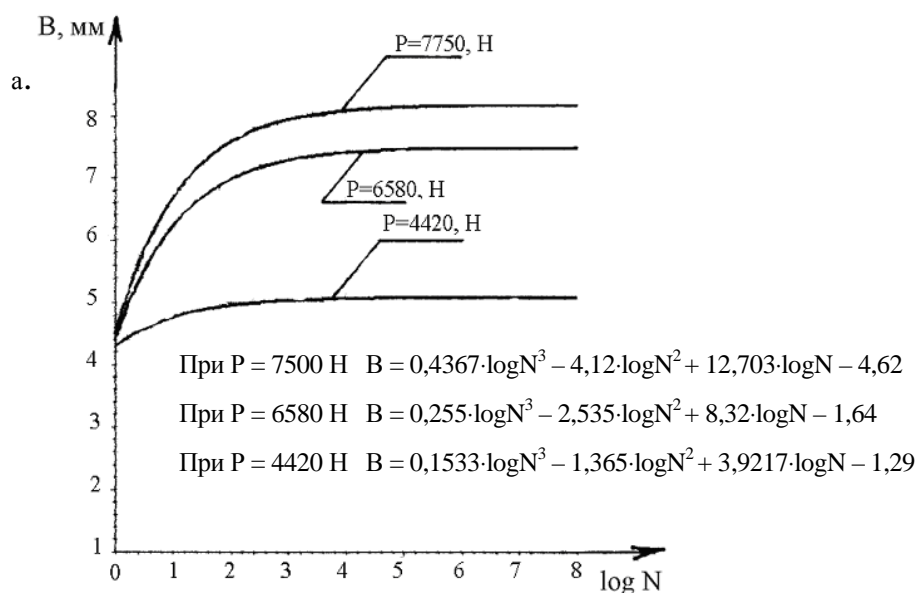


Рисунок 1

а – Зависимость  $B = f(\log N, P)$ ;

б – Приспособляемость материала при циклическом нагружении

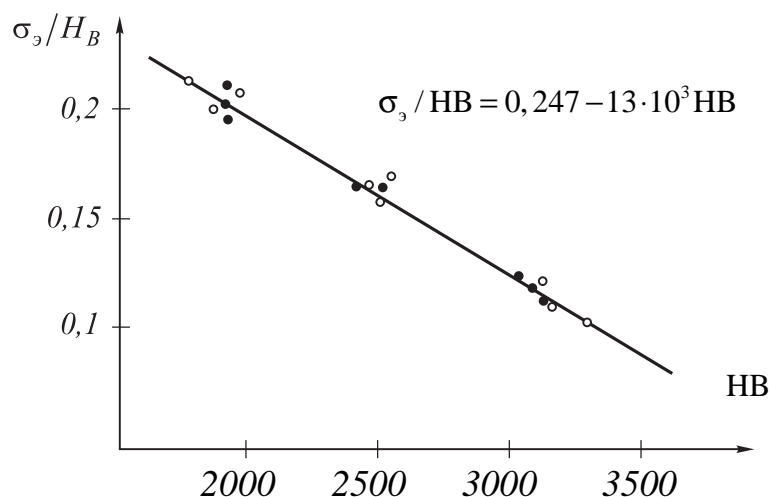


Рисунок 2 – График изменения соотношения  $\sigma_3/H_B$  в функции твердости для роликов: •, о – цилиндрических и выпуклых

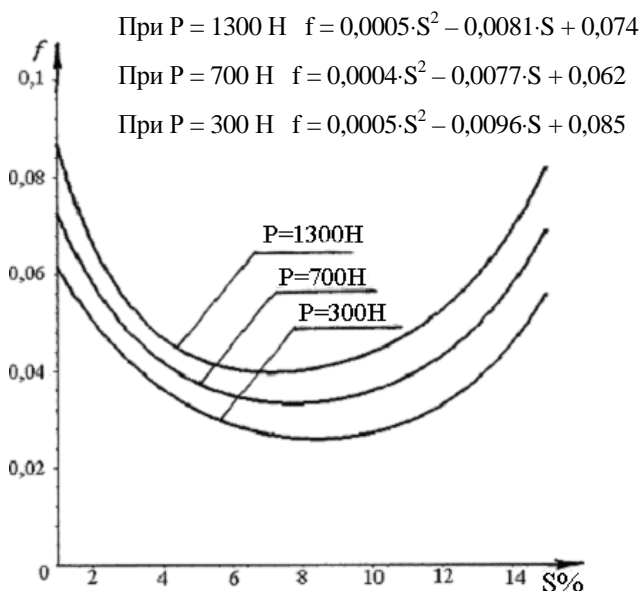


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента трения  $f$  от  $S$  при различных нагрузках

#### Литература

1. Раковский Х.В. Ходовая часть сверхтяжелых специальных агрегатов – рельсы – основание путей / Х.В. Раковский, Н.Х. Раковская-Башмакова. – Х.: МСУ, 1998.– 84 с.
2. Гордеев В.А. Рельсовые пути тяжелых транспортных устройств / В.А. Гордеев. – М.: Транспорт, 1981. – 158 с.
3. Динник А.Н. Удар и сжатие упругих тел / А.Н. Динник. – Избранные труды АН УССР, 1952. – Т.1. – С. 13–14.
4. Ковальский Б.С. Расчет деталей на местное сжатие / Б.С. Ковальский. – Х.: ХВКИУ, 1964. – 224 с.
5. Беляев Н.М. К вопросу о местных напряжениях в связи с сопротивлением рельсов смятию. Труды по теории упругости и пластичности / Н.М. Беляев. – М.: ГИТТЛ, 1957. – С. 215–231.



6. Решиков В.Ф. Трение и износ тяжело нагруженных передач / В.Ф.А. Решиков. – М.: Машиностроение, 1975. – 231 с.
7. Петрусевич А.И. Контактные напряжения, деформации, контактно-гидродинамическая теория смазки / А.И. Петрусевич. – М.: Институт Машиностроения АН СССР, 1950. – 369 с.
8. Петрусевич А.И. Зубчатые передачи / А.И. Петрусевич // Детали машин. – М.: Машгиз, 1953. – Кн. 1. – С. 199–332.
9. Технологическое оборудование космических комплексов (контактные задачи в расчетах агрегатов) / Х.В. Раковский, Н.Х. Раковская-Башмакова. – Х.: МСУ, 1998. – 142 с.
10. Расчет напряжений от касательной нагрузки в зоне контакта колеса и рельса / Б.С. Ковальский // Сб. науч. трудов ХВАИВУ. – Х.: ХВАИВУ, 1968. – Вып. 258. – С. 3–8.
11. Коровчинский М.В. Распределение напряжений в окрестности локального контакта упругих тел при одновременном действии нормальных и касательных усилий в контакте / М.В. Коровчинский. – М.: Машиностроение, 1967. – № 6. – С. 85–95.
12. О расчетных напряжениях в зоне контакта / Раковская-Башмакова Н.Х., Самойлова А.Х. // Вісник Міжнародного Слов'янського університету. Харків. Сер. «Технічні науки». – 1998. – Т. 1. – № 3. – С. 47–50.
13. Раковская Н.Х. К расчету крановых ходовых колес и рельсов // Науковий вісник будівництва Академії будівництва України. – 2003. – Вип. 24. – С. 150–159.
14. Экспериментальное исследование формирования контактной дорожки на поверхности рельсов / Н.Х. Раковская // Збірник наукових праць Харківського ІВПС ім. І. Кожедуба. – 2003. – Вип. 1(9). – С. 47–54.
15. Об определении площади контакта при комбинированном нагружении / Н.Х. Раковская // Вісник Міжнародного Слов'янського університету. Харків. Сер. «Технічні науки». – 2003. – Т. 6. – № 1. – С. 19–21.
16. О напряжениях в зоне контакта плоского колеса от действия нормальных сил с использованием трехмерной компьютерной графики / Н.Х. Раковская // Збірник наукових праць Української Державної академії залізничного транспорту. – 2004. – Вип. № 57. – С. 195–202.
17. Экспериментальное изучение поведения контактной зоны во времени / Х.В. Раковский, Н.Х. Раковская, А.Х. Раковская-Самойлова // Вісник Міжнародного Слов'янського університету. Харків. Сер. «Технічні науки». – 2001. – Т.4. – № 7. – С. 3–19.
18. Спицина И.О. Подшипники качения в подъемно-транспортных машинах / И.О. Спицина // Новая подъемно-транспортная техника. – М.: ВНИИПТМАШ, 1964. – № 3. – 82 с.
19. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н.И. Безухов. – М.: Высшая школа, 1968. – 512 с.
20. Беляев Н.М. Применение теории Герца к подсчетам местных напряжений в точке соприкосновения колеса с рельсом. Труды по теории упругости и пластичности / Н.М. Беляев. – М.: ГИТТЛ, 1957. – С. 9–31.
21. Об остаточных деформациях при взаимодействии твердых тел / Н.Х. Раковская // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – 2004. – Вип. 23. – С. 106–111.
22. Орлов А.В. Остаточные деформации при контактном нагружении / А.В. Орлов, С.В. Пинегин. – М.: Наука, 1971. – 62 с.
23. Пинегин С.В. Контактная прочность в машинах / С.В. Пинегин. – М.: Машиностроение, 1965. – 195 с.

## Bibliography (transliterated)

1. Rakovskiy H.V. Hodovaya chast sverhtyazhelyih spetsialnyih agregatov – relsyi – osnovanie putey H.V. Rakovskiy, N.H. Rakovskaya-Bashmakova. – H.: MSU, 1998.– 84 p.
2. Gordeev V.A. Relsovyie puti tyazhelyih transportnyih ustroystv V.A. Gorde-ev. – M.: Transport, 1981. – 158 p.
3. Dinnik A.N. Udar i szhatie uprugih tel A.N. Dinnik. – Izbrannyye trudy AN USSR, 1952. – T.1. – p. 13–14.
4. Kovalskiy B.S. Raschet detaley na mestnoe szhatie B.S. Kovalskiy. – H.: HVKIU, 1964. – 224 p.
5. Belyaev N.M. K voprosu o mestnyih napryazheniyah v svyazi s soprotivleniem relsov smyatiyu. Trudy po teorii uprugosti i plastichnosti N.M. Belyaev. – M.: GITTL, 1957. – p. 215–231.
6. Reschikov V.F. Trenie i iznos tyazhelonagruzhennyih peredach V.F.A. Reschikov. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 231 p.
7. Petrusevich A.I. Kontaktnyye napryazheniya, deformatsii, kontaktno-gidrodinamicheskaya teoriya smazki A.I. Petrusevich. – M.: Institut Mashinostroeniya AN SSSR, 1950. – 369 p.
8. Petrusevich A.I. Zubchatyye peredachi A.I. Petrusevich Detali mashin. – M.: Mashgiz, 1953. – Kn. 1. – p. 199–332.
9. Tehnologicheskoe oborudovanie kosmicheskikh kompleksov (kontaktnyye zadachi v raschetah agregatov) H.V. Rakovskiy, N.H. Rakovskaya-Bashmakova.– H.: MSU, 1998.– 142 p.
10. Raschet napryazheniy ot kasatelnoy nagruzki v zone kontakta koleasa i relsa B.S. Kovalskiy Sb. nauch. trudov HVAIVU.– H.: HVAIVU, 1968.– Vyip. 258.– p. 3–8.
11. Korovchinskiy M.V. Raspredelnie napryazheniy v okrestnosti lokalnogo kontakta uprugih tel pri odnovremennom deystvii normalnyih i kasatelnyih usiliy v kontakte M.V. Korovchinskiy. – M.: Mashinostroenie, 1967. – # 6. – p. 85–95.
12. O raschetnyih napryazheniyah v zone kontakta Rakovskaya-Bashmakova N.H., Samoylova A.H. Visnik Mizhnarodnogo Slov'yanskogo universitetu. Harkiv. Ser. «Tehnichni nauki».– 1998. – T. 1.– # 3.– p. 47–50.
13. Rakovskaya N.H. K raschetu kranovyih hodovyih koleas i relsov Naukoviy visnik budivnitstva Akademiyi budivnitstva Ukrayini.– 2003.– Vip. 24.– p. 150–159.
14. Eksperimentalnoe issledovanie formirovaniya kontaktnoy dorozhki na poverhnosti relsov N.H. Rakovskaya Zbirnik naukovih prats Harkivskogo IVPS im. I. Kozheduba.– 2003.– Vip. 1(9).– p. 47–54.
15. Ob opredelenii ploschadi kontakta pri kombinirovannom nagruzhennii N.H. Rakovskaya Visnik Mizhnarodnogo Slov'yanskogo universitetu. Harkiv. Ser. «Tehnichni nauki».– 2003.– T. 6.– # 1.– p. 19–21.
16. O napryazheniyah v zone kontakta ploskogo koleasa ot deystviya normalnyih sil s ispolzovaniem trehmernoy kompyuternoy grafiki N.H. Rakovskaya Zbirnik naukovih prats Ukrayinskoyi Derzhavnoyi akademiyi zaliznichnogo transportu.– 2004.– Vip. # 57. – p. 195–202.
17. Eksperimentalnoe izuchenie povedeniya kontaktnoy zonyi vo vremeni H.V. Rakovskiy, N.H. Rakovskaya, A.H. Rakovskaya-Samoylova Visnik Mizhnarodnogo Slov'yanskogo universitetu. Harkiv. Ser. «Tehnichni nauki»– 2001.– T.4.– # 7.– p. 3–19.
18. Spitsina I.O. Podshipniki kacheniya v pod'emno-transportnyih mashinah I.O. Spitsina Novaya pod'emno-transportnaya tehnika. – M.: VNIPTMASH, 1964. – # 3. – 82 p.

19. Bezuhov N.I. Osnovy teorii uprugosti, plastichnosti i polzuchesti N.I. Bezuhov. – M.: Vysshaya shkola, 1968. – 512 p.

20. Belyaev N.M. Primenenie teorii Gertsya k podschetam mestnykh napryazheniy v tochke soprikosnoveniya koleasa s relsom. Trudy po teorii uprugosti i plastichnosti N.M. Belyaev. – M.: GITTL, 1957. –p. 9–31.

21. Ob ostatochnykh deformatsiyah pri vzaimodeystvii tverdykh tel N.H. Rakovskaya Visnik Harkivskogo derzhavnogo tehnicnogo universitetu silskogo gospodarstva.– 2004.– Vip. 23.– p. 106–111.

22. Orlov A.V. Ostatochnyie deformatsii pri kontaktnom nagruzhении A.V. Orlov, S.V. Pinegin. – M.: Nauka, 1971. – 62 p.

23. Pinegin S.V. Kontaktnaya prochnost v mashinah S.V. Pinegin. – M.: Mashinostroenie, 1965. – 195 p.

УДК 623.438.1

Кебало П.В., Мормило Я.М., Радченко И.Г., Соловей С.А., Угненко Д.Н.

**БАЗОВЫЙ ТИП ХОДОВОЙ ЧАСТИ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ТАНКА**

**Введение.** В настоящее время в Украине на вооружении сухопутных войск состоят танки, разработанные и выпускавшиеся еще во времена Советского Союза. К настоящему моменту подавляющее большинство из них уже не отвечают современным требованиям, предъявляемым по подвижности, а заложенный в конструкциях их ходовых частей ресурс практически полностью исчерпан. В связи с этим, в Украине, актуальной задачей стоит разработка танка, отвечающего всем требованиям настоящего времени и с большим потенциалом для модернизации. Естественно, что при тех потребностях, которые сегодня испытывают Вооруженные Силы Украины (ВСУ), и сложившейся технико-экономической ситуацией в стране, освоение принципиально новой конструкции потребует весьма значительных затрат. Выходом из данной ситуации может быть использование отработанных конструкторско-технологических решений с соответствующими доработками.

**Цель работы** – выработка рекомендаций по выбору конструкции ходовой части перспективного танка для ВСУ.

**Основная часть.** Сравнительная оценка конструкций и характеристик ходовых частей танков Т-64, Т-72, Т-80 и их модификаций.

Конструкции всех трех типов ходовых частей (Т-64, Т-72, Т-80) по основным узлам и деталям не взаимозаменяемы, обладают существенными отличиями, и, как следствие, требуют наличия в войсках большой номенклатуры запасных частей, инструмента и приспособлений для обслуживания и ремонта.

Выделим основные конструктивные отличия ходовых частей вышеперечисленных танков, которые определяют номенклатуру требуемых запасных частей, инструментов и приспособлений.

По гусеничному движителю:

– типа Т-64 – имеет гусеницу со стальной беговой дорожкой и параллельным резинометаллическим шарниром (РМШ), опорные и поддерживающие катки (ОК и ПК) со стальным ободом и внутренней амортизацией, ОК выполнен в сборе со ступицей;

– типа Т-80 – имеет гусеницу с обрезиненной беговой дорожкой и параллельным РМШ, ОК и ПК с наружной амортизацией, ОК выполнен со съемными (легкозаменяемыми) массивными шинами;

– типа Т-72 – имеет гусеницу со стальной беговой дорожкой и последовательным РМШ, ПК со стальным ободом и внутренней амортизацией, ОК с наружной амортизацией в сборе со ступицей.

По системе поддрессоривания:

– все танки имеют индивидуальную торсионную подвеску;

– типа Т-72 – лопастные гидроамортизаторы;

– типа Т-64 и Т-80 – телескопические гидроамортизаторы.

Основные параметры типов ходовых частей представлены в табл. 1.

Как видно из таблицы 1, основные параметры всех типов ходовых частей примерно одинаковы, при этом следует отметить, что допускаемые нагрузки на ОК существенно отличаются (примерно на 10–20 %), что говорит о разном потенциале модернизации каждой конструкции.

Таблица 1

Тип параметров	Наименование параметра	Обозначение танка		
		T-64	T-72	T-80
Подвеска	Кол-во, шт.	12		
	Радиус балансира, мм	380	250	350
	Средняя жесткость, кН/м	220	265	223
	Средние статические хода катков, мм	90	107	120
	Средние динамические хода катков, мм	245	271	265
Амортизаторы	Кол-во на борт, шт.	3	3	3
	Сопrotивление прямого хода при скорости 1м/с, кН	90	40	120*
	Площадь охлаждения, м <sup>2</sup>	0,226	0,38	0,339*
	Рассеиваемая мощность, кВт (при разности температур 100 °С)	2,5	3	3,5*
Опорный каток (ОК)	Диаметр и ширина обода, мм	555×95 (общая)	750×190	670×170
	Кол-во ободьев, шт.	2	2	2
	Максимально допустимая нагрузка на опорный каток, кг	4200	5100	4600
Поддерживающий каток	Кол-во на изделии	8	6	10*
	Диаметр и ширина обода	225×62	204×80	225×125
Направляющее колесо с механизмом натяжения	Тип механизма	Кривошипно-червячный, механический		
	Обод направляющего колеса	Идентичный ОК и взаимозаменяемый с ним	Литой из спецстали	
Ведущее колесо	Количество зубьев венцов	12	14	12
	Ограничители сброса гусеницы	На зубьях венцов	Ограничительные кольца на дисках	
Гусеницы	Шаг, мм	164	137	164
	Ширина, мм	540	580	580
	Кол-во траков, шт.	79–78	108	80

\* данные для модификации T-80УД

Проведем сравнительный анализ 3 типов ходовых частей по следующим основным критериям, определяющим их качество:

– надежность, характеризующаяся параметром потока отказов (W) определяемым по формуле:

$$W = (Q \cdot 1000) / (q \cdot V),$$

где Q – общее количество отказов; q – количество испытуемых изделий; V – объем испытаний, км [6];

- проходимость по различным грунтам;
- взаимная унификация узлов и возможность создания семейства машин различного назначения на одной базе;
- освоенность конструкции заводами Украины;
- технико-массовые показатели, включающие массу узлов и деталей ходовой части и затраты мощности в гусеничном движителе на различных скоростях движения;
- эргономические показатели, характеризующие обитаемость экипажа – плавность хода и вибронгруженность.

При проведении сравнительной оценки всех трех типов ходовой части возможных к применению в конструкции перспективного танка Украины будем руководствоваться результатами сравнительных испытаний танков T-64, T-72, T-80 и их модифика-

ций в различных почвенно-климатических условиях. Результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2

Наименование параметра	Наименование показателей	Обозначение танка		
		T-64	T-80	T-72
Надежность (по данным испытаний в период 1976–1984 г.г.)	Средние скорости движения машин, км/ч	20...38,3	23,6...51,7	23,6...41,9
	Параметр потока отказов (W): – при объеме испытаний до 6000 км. [6]	0,2	0,49	0,22
	– при объеме испытаний от 6000 до 10000 км. [2]	0,17	0,67	1,25
Проходимость	На заснеженных участках [1]	Преодолевают участки длиной более 30 м с глубиной снежного покрова до 1 м без застреваний		
	На заболоченной местности (количество опытов/кол-во застреваний) [3]	11/0	13/3	12/4
Плавность хода	– высота проходной неровности, м [5]	0,13	0,145	0,15
Технико-массовые показатели	Общая масса узлов ходовой части/масса узлов изготовленных из цветных металлов, кг	6217/152	8386/780	8482/1110
	Средние относительные затраты мощности на перематывание гусениц и качение ОК при скоростях движения от 5 до 15 м/с (за базовые приняты показатели танка T-64), кВт [7]	1	1,305	1,123
Виброагрессивность при движении по бетонной трассе, в единицах «g» (полуценное [4] допускаемое значение [8])	Место измерений:			
	– башня, в районе левого оператора	1,8/3	1/3	-
	– корпус на борту в районе 4-й подвески	7...12/6	4...6/6	-
	– МТО и днище	8...12/10	10/10	-

Из таблицы видно, что в исследованных параметрах надежности, подвижности и экономичности, таких как кол-во отказов, кол-во ремонтов на одно изделие, проходимость болот, общая масса узлов, затраты мощности – ходовая часть танка T-64 и его модификаций имеет лучшие показатели, при этом имея и большую виброагрессивность.

Наибольшие кол-ва отказов ходовой части танков типа T-72 и T-80 приходится на разрушение резиновых шин опорных катков [1,2,6], что стало следствием стремления снизить виброагрессивность элементов ходовой части и не могло не учитываться при проектировании данных конструкций.

Исходя из многолетнего опыта производства, испытаний и эксплуатации можно отметить следующие недостатки присущие каждому типу ходовой части:

1. Для танков типа T-64:

- повышенная виброагрессивность элементов ходовой части [4];
- отсутствие узловой установки поддерживающих катков;
- трудоемкая операция замены трака гусеницы;
- высокая тепловая напряженность подшипниковых узлов.

2. Для танков типа T-80:

- трудоемкая операция замены торсионных валов подвески, со снятием дисков опорных катков;
- низкая надежность шин опорных катков при эксплуатации на каменистых грунтах из-за повреждения шин посторонними предметами, а также гребнями при сбросе гусеницы;
- отсутствие узловой установки поддерживающих катков;

- трудоемкая операция замены трака гусеницы;
- 3. для танков типа Т-72:
  - трудоемкая операция замены торсионных валов подвески, со снятием опорных катков;
  - низкая надежность шин опорных катков при эксплуатации на каменистых грунтах из-за повреждения шин посторонними предметами, а также гребнями при сбросе гусеницы;

Общим для всех изделий является отсутствие автоматического изменения клиренса и натяжения гусениц.

Для повышения эксплуатационных характеристик на опытных образцах танков с ходовой частью типа Т-64 были реализованы конструктивные мероприятия включающие:

- установку опорных катков с промежуточными резиновыми амортизаторами для уменьшения износа ободьев и повышения устойчивости гусеницы;
- установку подвесок с увеличенным динамическим ходом, гидроамортизаторов с двухступенчатой характеристикой и торсионных валов дифференцированной жесткости для повышения плавности хода и средних скоростей движения;

Для улучшения эксплуатационных характеристик танков с ходовой частью типа Т-80, в данную конструкцию были внесены следующие изменения, включающие:

- уменьшение зазора между отбойниками на борту изделия с внутренним венцом ведущих колес и установлены усиленные реборды дисков с улучшенной контактной поверхностью;
- увеличение радиусов балансиров с 350 мм до 420 мм направленное на увеличение динамических ходов изделия, что также дало возможность производить замену торсионных валов подвески без демонтажа дисков опорных катков, и гидроамортизаторов с двухступенчатой характеристикой для повышения плавности хода и средних скоростей движения.

Кроме всего вышеперечисленного, при выборе типа ходовой части перспективных танков и других боевых машин следует учитывать такой фактор как освоенность конструкции производством.

По данному критерию конструкции ходовых частей танков типа Т-64 и Т-80 имеют равные права, поскольку данные танки выпускались на Украине, а освоение конструкции ходовой части танков типа Т-72 требует значительных затрат на подготовку производства.

Следует также отметить, что в последнее время получили распространение тяжелые боевые машины пехоты, изготовленные на базе танка и имеющие сопоставимую защищенность. Для данных машин ходовая часть танков типа Т-64 более предпочтительна, поскольку уже есть опыт ее применения в конструкции тягача МТ-Т (масса 25 т.), а ходовые части танков типа Т-72 и Т-80 для машин подобных классов не использовались. При этом возможно использование оставшегося на складах большого количества запасных частей танка Т-64 и комплектующих со снимаемых с вооружения танков.

Сейчас в Украине принята программа модернизации танков типа Т-64 до максимально возможного уровня, реализуемого без значительных затрат и первые машины, получившие обозначение БМ «Булат», уже поступили на вооружение ВСУ. Применение данного типа ходовой части не потребует дополнительного переучивания специалистов на эксплуатацию новой конструкции.

**Выводы:** 1. Сравнительные испытания танков Т-64, Т-72, Т-80 и их модификаций, проведенные в различных почвенно-климатических условиях, показали, что все

три типа ходовой части обеспечивают удовлетворительные надежность, маневренность и проходимость при решении сложных задач в условиях приближенных к боевым.

2. Вариант ходовой части танка типа Т-64, является на сегодняшний день основным в ВСУ (Из сайта Министерства обороны Украины, по состоянию на 2004 г. на вооружении состояло 2281 танк Т-64, 1302 – Т-72 и 273 – Т-80 всех модификаций) и, как видно из табл. 2, он имеет больше преимуществ, чем какой-либо другой. По мнению авторов, на сегодняшний день целесообразным является использование данного типа ходовой в конструкциях вспомогательных машин с использованием задела комплектующих хранящегося на складах, а также модернизируемых танков.

3. Вариант ходовой части танка типа Т-80 освоен производством, имеет большой потенциал для модернизации и является основным для танков, поставляемых в другие страны.

4. Поскольку два типа конструкций ходовой части типа Т-64 и Т-80 примерно равноценны по своим характеристикам, для выбора типа ходовой части перспективного танка необходимо проведение в полном объеме сравнительных испытаний танков укомплектованных каждым типом ходовой части. При этом оптимальным вариантом решения будет такая конструкция, при которой возможна установка на один и тот же танк различных вариантов в зависимости от условий эксплуатации и требований покупателей с возможностью их замены без доработок сопрягаемых деталей корпуса и силовой передачи.

### Литература

1. Акт о результатах войсковых испытаний изд. 219, 447А, 172 выпуска 1979г. Тема 8733 С. 103–104.

2. Акт о результатах войсковых испытаний изд. 219, 447А, 172 Тема 9562. С. 199–220.

3. Технический отчет по результатам сравнительных испытаний проходимости изд. 219, 434, 172 Тема 6951. С. 80.

4. Отчет №100 о результатах сравнительных испытаний по определению вибронагруженности изд. 478Б и 478ДУ. 1993г. С. 8.

5. Исследование характеристик изд.219, 434, 172, 162. Тема 7056/7057. 1976 г. С. 62.

6. Акты и отчеты о результатах войсковых испытаний изд. 219, 447А, 172 и их модификаций за 1976–93 г.г.

7. Теория изделия, под ред. П.П. Исакова, раздел «ходовая часть» Тема 6760 1979 г. С. 236–237.

8. ОСТ В2-20.39.045 Комплексная система общих технических требований «Электрооборудование ВГМ».

### Bibliography (transliterated)

1. Akt o rezultatah voyskovyih ispytaniy izd. 219, 447A, 172 vyipuska 1979g. Tema 8733 p. 103–104.

2. Akt o rezultatah voyskovyih ispytaniy izd. 219, 447A, 172 Tema 9562. S. 199–220.

3. Tehnicheskiy otchet po rezultatam sravnitelnyih ispytaniy prohodimosti izd. 219, 434, 172 Tema 6951. p. 80.

4. Otchet #100 o rezultatah sravnitelnyih ispytaniy po opredeleniyu vibronagruzhenosti izd. 478B i 478DU. 1993g. p. 8.

5. Issledovanie harakteristik izd.219, 434, 172, 162. Tema 7056/7057. 1976 g. p. 62.



6. Aktyi i otchetyi o rezultatah voyskovyih ispyitaniy izd. 219, 447A, 172 i ih modifikatsiy za 1976–93 g.g.

7. Teoriya izdeliya, pod red. P.P. Isakova, razdel «hodovaya chast» Tema 6760 1979 g. p. 236–237.

8. OST V2-20.39.045 Kompleksnaya sistema obschih tehnicheskih trebovaniy «Elektrooborudovanie VGM».

УДК 623.438.1

Кебало П.В., Мормило Я.М., Радченко І.Г., Соловей С.А., Угненко Д.Н.

### **БАЗОВИЙ ТИП ХОДОВОЇ ЧАСТИНИ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ТАНКУ**

Стаття присвячена аналізу конструктивних особливостей та зауважень, отриманих під час експлуатації танків і спрямована на вироблення рекомендацій щодо вибору типу ходової частини перспективного танку.

УДК 620.193.01

Товажнянский Л.Л., Чуняев О.Н., Заец И.И., Чуняева Л.О.

## НАНОТЕХНОЛОГИЯ В ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

В Национальном Техническом Университете «ХПИ», на основе открытия №368 от 13.07.89 (реестр СССР), разработана технология диффузионного карбидного поверхностного легирования (ДКПЛ).

Изначально, она разрабатывалась с целью замены объемно легированных (нержавеющих) сталей, работающих в самых агрессивных средах химической и добывающей промышленности, на поверхностно легированные. Первые детали, защищенные по технологии ДКПЛ – крыльчатки насосов содового производства, производства азотной, серной кислот, запорная арматура превенторов нефтедобывающих скважин, по ресурсу работы превзошли незащищенные в 4–6 раз. При этом было установлено, что коррозионная стойкость железоуглеродистых сплавов, при поверхностном легировании активными карбидообразователями, увеличивается, по мере повышения концентрации углерода в легируемом сплаве. Обнаруженная закономерность и явилась сутью зарегистрированного открытия, послужив толчком к научному и технологическому развитию ДКПЛ.

В течение длительного времени с момента разработки, технология ДКПЛ развивалась как современная технология химико-термической обработки (ХТО) из насыщающих порошковых смесей, созданная на основе хромирования газовым контактным способом. Ее принадлежность к «классическим» диффузионным порошковым технологиям ХТО определялась следующими признаками:

- 1) конструктивной простотой и габаритами оборудования [2, 3, 4];
- 2) научно-обоснованное управление процессом, по-прежнему, осуществлялось на мезоскопическом уровне, путем изменения температурно-временных условий легирования, массовой доли основных компонентов шихты, подбором легируемого сплава с максимально допустимой (по условиям работы конкретной детали) концентрацией углерода [5, 6, 7, 8, 16];
- 3) гранулометрия компонентов шихты изменялась в пределах от 2 мм до 5 мкм, то есть на мезо- и микроскопическом уровнях [5, 6, 7, 8, 16];
- 4) конечный продукт обработки – карбидный слой определенного состава (например,  $Cr_{23}C_6$ ,  $TiC$ ,  $NbC$ ) – имеет толщину в пределах 5–50 мкм, то есть находится на микроскопическом уровне [5, 6, 7];
- 5) формирование сплошного, химически чистого слоя карбида насыщающего элемента, объяснялось его термодинамической стабильностью, влиянием встречной диффузии реагентов и протеканием процесса зарождения и роста карбидной фазы не в поверхностных слоях легируемого изделия (то есть в металлической матрице на некоторой глубине [7, 8, 9, 16]), а в поверхностной фазе Гиббса (то есть непосредственно на поверхности изделия [10, 11, 12]). Кроме теоретического, данный факт находил практическое подтверждение постоянно наблюдаемым (и регулируемым с точностью  $\pm 1$ –2 мкм) приростом размеров легируемого изделия на толщину карбидного слоя. Таким образом, образование нетипичного, для диффузионного процесса, химически чистого слоя, объяснялось кинетическими условиями его образования и термодинамической стабильностью.

Однако с началом промышленного использования технологии ДКПЛ было установлено, что разработанная теория образования карбидного слоя и методы управления процессом карбидного поверхностного легирования адекватны лишь для определенных условий, а именно:

1) необходимую активность насыщающих смесей удавалось поддерживать путем изменения массовой доли и дисперсности основных ее компонентов лишь при первых циклах использования (с 1 по 4–5 циклы). Эффективность дальнейших корректировок, проводимых по существовавшим методикам, резко снижалась. В результате, воспроизводимость результатов легирования, в пределах 5 % отклонения, утрачивалась к 10–15 циклу использования шихты, несмотря на высокое содержание основного насыщающего элемента в химически несвязанной форме.

2) было обнаружено, что толщина карбидного слоя соответствует приросту размеров легируемого изделия лишь при легировании в массивных контейнерах, либо при нагреве в маломощных печах, в которых невозможно осуществить нагрев садки со скоростью более 100–150 °С/час. Однако при использовании теплотехнически тонких контейнеров и мощных малоинерционных печей было обнаружено, что толщина образующегося карбидного слоя может превышать прирост легируемого изделия на сторону. Например, при легировании стали Х12МФ карбидом хрома  $Cr_{23}C_6$ , при температуре 1100 °С в течение 5 ч, был получен карбидный слой толщиной  $12 \pm 1$  мкм при нагреве садки со скоростью 100 °С/час. Сечение образцов в указанном опыте увеличилось на 22–25 мкм. Однако опыт с форсированным нагревом, проводимым со скоростью 300 °С/час, при постоянстве всех остальных технологических параметров, привел к образованию карбидного слоя толщиной  $30 \pm 2$  мкм. А сечение образцов увеличилось только на 40–42 мкм (вместо ~ 60 мкм). Следовательно, зарождение карбидного слоя в последнем опыте произошло в легируемой матрице, а именно, в сечении от 0 до 10 мкм от поверхности. При этом, в обоих опытах, карбидные слои оказались практически идентичны по химическому составу: 92–93 % Cr, 5–6 % C (соответствие стехиометрическому  $Cr_{23}C_6$ ), 0,5–1 % N, 0,5–1 % Si, остальные примеси определялись как следы. Полученные результаты не согласовывались с существующими теориями, говорящими о том, что химически чистый карбидный слой в подобной системе либо не может образоваться вообще [8, 9, 16], либо может быть получен только при его зарождении и смыкании в поверхностной фазе Гиббса [10, 11, 12].

3) В ходе освоения технологии ДКПЛ было установлено, что одним из видов брака, наблюдаемого при использовании шихт, прошедших 10–15 цикловую наработку и корректируемых по существовавшим методикам, является образование загрязненных железом карбидных слоев, неоднородных по химическому составу. Например, при легировании карбидом хрома стали 45, образовывались слои состава  $(Cr_xFe_y)_{23}C_6$  толщиной 12–15 мкм, где значение  $x$  изменялось от 0,75 до 0,9, а  $y$  – от 0,25 до 0,1 соответственно. В слое также присутствовали включения чистого  $Cr_{23}C_6$  в виде отдельных областей поверхности или островков. Подобные слои сохраняют высокую твердость и износостойкость, присущую слоям чистого  $Cr_{23}C_6$ , однако подвержены коррозии, из-за своей электрохимической неоднородности и неустойчивости пассивного состояния для  $(Cr_xFe_y)_{23}C_6$  [14].

При попытке исправить такой брак, было проведено повторное легирование изделий в свежей шихте с высоким хромирующим потенциалом, в расчете на «достройку» химически чистого слоя  $Cr_{23}C_6$ , на поверхности слоя смешанных карбидов  $(Cr_xFe_y)_{23}C_6$ , (что должно было произойти за счет осаждения свободного хрома из шихты и встречной диффузии углерода через дефекты слоя  $(Cr_xFe_y)_{23}C_6$ , согласно су-

ществующей теории). Однако вместо «достройки» произошло полное химическое рафинирование некондиционного слоя  $(Cr_xFe_y)_{23}C_6$  до слоя состава  $Cr_{23}C_6$  с остаточным содержанием железа менее 0,5 %, сопровождавшееся минимальным (на 2–4 мкм) увеличением суммарной толщины карбидного слоя. Полученный результат шел вразрез с положением о том, что при условиях легирования, карбидный слой является не только термодинамически выгодным, но и термодинамически стабильным продуктом (то есть неспособным к химической перестройке).

Природа обнаруженных закономерностей была раскрыта, при проведении углубленных исследований массопереноса при ДКПЛ железоуглеродистых сплавов, изучении влияния режимов термообработки и теплофизических параметров загрузок на свойства карбидного слоя, и работ по созданию железоуглеродистых сплавов с заданным градиентом химического состава и механических свойств.

Было установлено, что на активность шихт используемых при ДКПЛ решающее влияние оказывают пленочные процессы, и процессы, протекающие на границах раздела фаз [15, 18], а именно:

- восстановление поверхностных оксидных пленок  $Cr_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ; активными восстановителями, например хлоридами  $SiCl_4$ ,  $AlCl_3$  и углеродом, является обязательным условием получения воспроизводимых результатов легирования;

- диффузия солей  $CrCl_3$ ,  $CrCl_2$  через поверхностные оксидные пленки  $Cr_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  может стать лимитирующей стадией процесса (что и наблюдается после 4–5 цикла использования шихт, корректируемых по существовавшим методикам, не предусматривавшим введение раскислителей);

- диффузия солей  $CrCl_3$ ,  $CrCl_2$  через слои расплава  $CrCl_2$ ,  $FeCl_2$ ,  $MnCl_2$ , находящегося на поверхности феррохрома и легируемого металла при температуре легирования, так же может быть лимитирующей, а сам процесс ДКПЛ, при легировании карбидом хрома в порошковых смесях, протекает по смешанному газовой-жидкостному механизму;

- побочное азотирование феррохрома и диффузия хрома из матрицы феррохрома к поверхностной фазе через нитридные пленки может понизить хромирующий потенциал, либо стать лимитирующей стадией (что наблюдается в раскисленных шихтах после 10–15 цикла использования, особенно при использовании активаторов, содержащих азот);

Управление указанными процессами стало возможным путем расчета и контроля химического потенциала реагентов в поверхностных нано-размерных слоях компонентов системы: насыщающий компонент – расплав – газ носитель – расплав – легируемое изделие. А также благодаря контролю и управлению изменением химического потенциала во времени. В результате, технология ДКПЛ трансформировалась в нанотехнологию, обеспечивающую формирование поверхностного карбидного слоя толщиной 5–50 мкм со скоростью 1–5 нм/сек.

При изучении влияния режимов термообработки и теплофизических параметров загрузок на свойства карбидного слоя, а также анализе имеющихся данных по скоростным методам ХТО [7, 8, 9, 13, 16, 19], таких, как хромирование с нагревом ТВЧ, хромирование газовым бесконтактным способом при форсированном нагреве, было установлено, что – при одинаковом химическом потенциале карбидообразователя в насыщающей среде и углерода в легируемом сплаве, решающее влияние, на механизм и глубину зарождения карбидного слоя, оказывает скорость нагрева легируемого изделия. Это влияние обусловлено тем, что в зависимости от скорости нагрева, изменяется время инициирования  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения в поверхностной фазе Гиббса легируемого

сплава, обусловленное легированием карбидообразователями ( $\alpha$ -образующими элементами) [13, 19].

Протекание  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения скачкообразно (приблизительно на порядок) увеличивает скорость диффузии карбидообразователя в матрицу легируемого сплава за счет образования огромного числа структурных дефектов (преимущественно вакансий) в зоне, затронутой превращением. В результате, в зависимости от скорости нагрева, возможно возникновение трех, принципиально отличающихся механизмов поверхностного легирования карбидообразователями, два из которых приводят к образованию карбидного слоя:

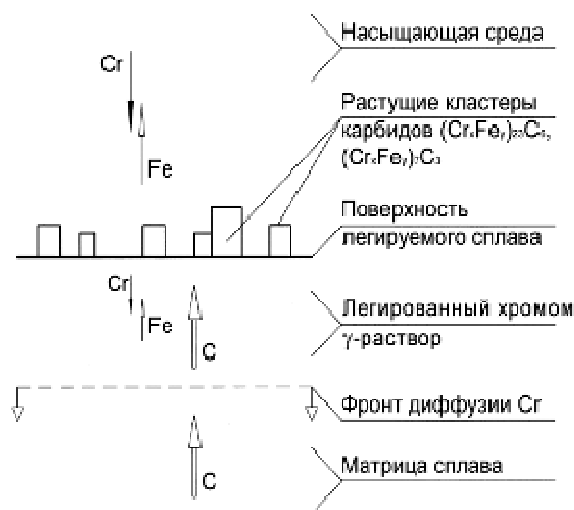


Рисунок 1 – Зарождение карбидного слоя:  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения нет

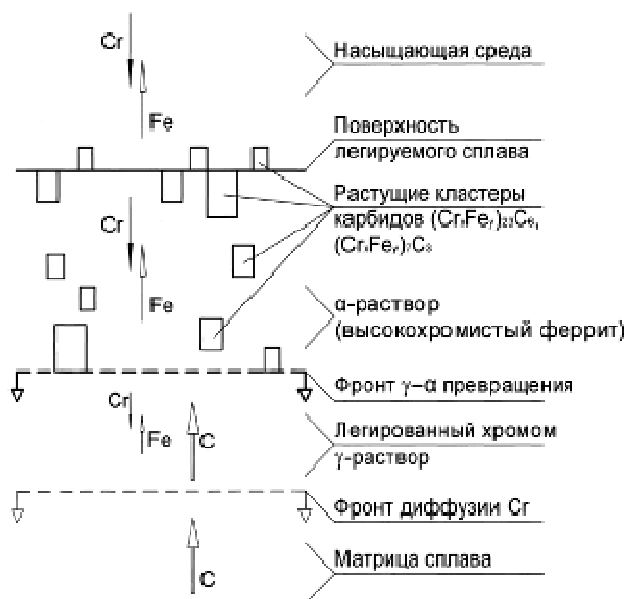


Рисунок 2 – Зарождение карбидного слоя:  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение происходит до смыкания карбидного слоя

1)  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение задержано во времени, в результате чего встречный диффузионный поток углерода из матрицы легируемого сплава успевает заблокировать диффузионный поток карбидообразователя, путем связывания атомов последнего в карбиды в поверхностной фазе Гиббса (рис. 1). Образующиеся, и растущие таким образом, карбидные микрокристаллы (кластеры), заполняют всю поверхность легируемого изделия, смыкаясь в карбидный монослой (рис. 3). После этого дальнейший рост карбидного слоя продолжается за счет «достройки» карбидного монослоя снаружи за счет атомов карбидообразователя, поставляемых из насыщающей среды, и атомов углерода, диффундирующих по дефектам растущего слоя (рис. 5). По мере приближения к равновесию рост карбидного слоя резко замедляется, микродефекты уплотняются и перестраиваются до полного исчезновения видимой (до 2000-кратного увеличения) микроструктуры (рис. 7, 8). Именно такой механизм формирования карбидного слоя при использовании технологии ДКПЛ (далее по тексту – механизм роста I) был предложен и детально изучен авторами [10, 11, 12]. Как уже отмечалось выше, он характерен для скоростей нагрева менее 100–150 °С/час.2)  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение происходит до смыкания карбидных нанокластеров в поверхностный монослой, в результате чего атомы карбидообразователя успевают продиффундировать в матрицу сплава на некоторую глубину, где связываются с диффундирующим навстречу углеродом и, частично, элементами

матрицы, растворимыми в образующихся карбидах (рис. 2). Образующийся таким образом диффузионный слой постепенно уплотняется за счет встречной диффузии реагентов и частичного растворения в нем матрицы сплава, в результате превращаясь в карбидный (рис. 4). Смыкание карбидного слоя в зоне, затронутой  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращением, сопровождается оттоком элементов матрицы и постепенным исчезновением остаточных прослоек  $\alpha$  фазы (рис. 6). Дальнейший рост карбидного слоя осуществляется, как и в случае (1). Нижняя граница диапазона скоростей нагрева, обеспечивающая данный механизм, находится в пределах 100–150 °С/час; а верхняя – в пределах 10–100 °С/мин, и сильно зависит от углеродного потенциала легируемого сплава (чем выше углеродный потенциал, тем выше возможная скорость нагрева, при которой еще происходит образование сплошного карбидного слоя). Указанный механизм образования карбидных слоев (далее по тексту – механизм роста II) предложен авторами [8, 9, 13, 16, 19], и говорит о том, что образующийся карбидный слой должен быть смешанным (типа  $(Cr_xFe_y)_{23}C_6$ ). Однако, (как было сказано выше) опыт применения технологии ДКПЛ показал, что это не так.

3)  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение не просто происходит до смыкания карбидных нанокластеров, а сопровождается таким мощным диффузионным потоком карбидообразователя в матрицу легируемого сплава, что образующиеся карбидные зародыши так и остаются в виде удаленных друг от друга дисперсных включений, лишь частично коагулирующих при увеличении длительности легирования. Подобный механизм поверхностного легирования (далее по тексту – механизм роста III) детально изучен многими авторами [7, 8, 9, 13, 16, 17, 19], при исследовании скоростных методов ХТО, и выходит за рамки технологии карбидного поверхностного легирования, поскольку не приводит к образованию поверхностного карбидного слоя как такового. Диапазон скоростей нагрева, обеспечивающих данный механизм, находится выше 10–100 °С/мин, и так же сильно зависит от углеродного потенциала легируемого сплава (по данному механизму так же происходит поверхностное легирование низкоуглеродистых сталей с обычными скоростями нагрева).

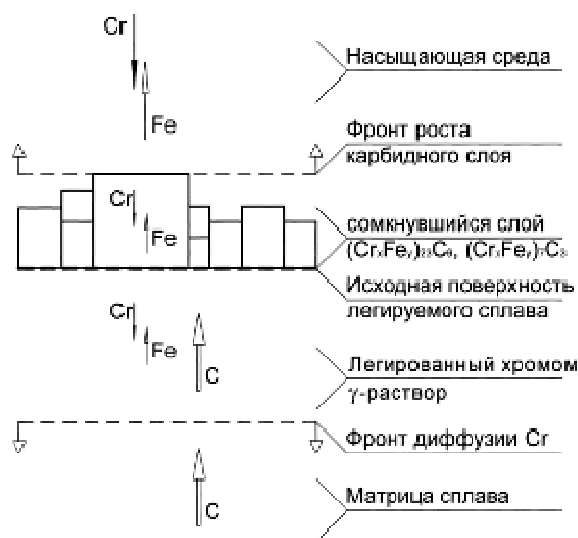


Рисунок 3 – Смыкание карбидного слоя:  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения нет

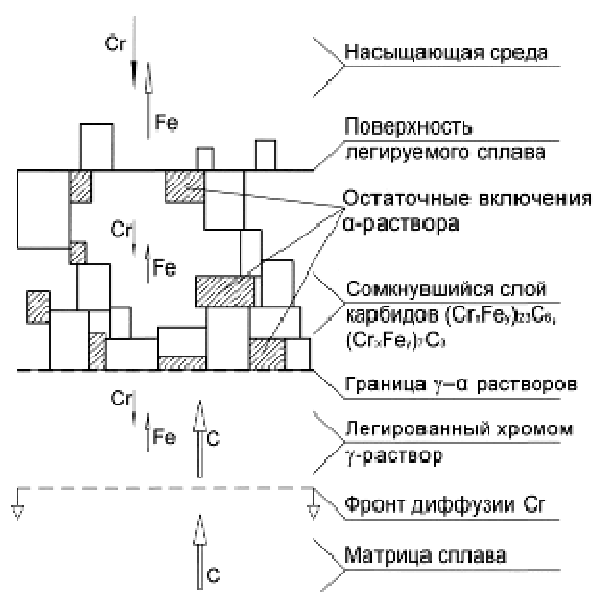


Рисунок 4 – Смыкание карбидного слоя в зоне, затронутой  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращением

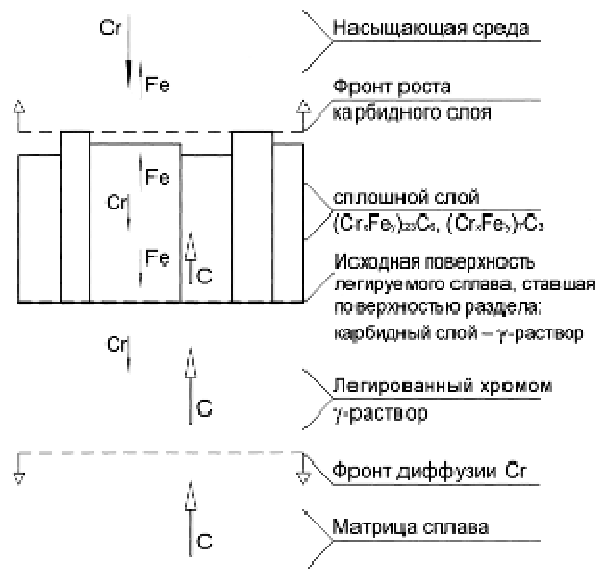


Рисунок 5 – Рост карбидного слоя:  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения нет

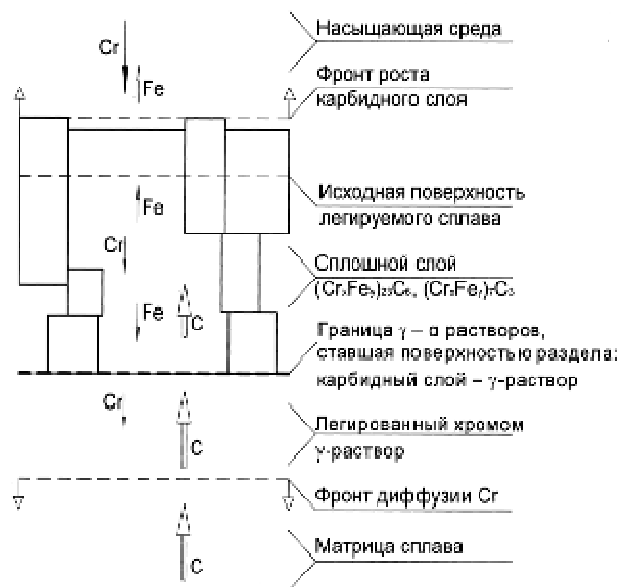


Рисунок 6 – Рост и уплотнение карбидного слоя, исчезновение  $\alpha$ -включений

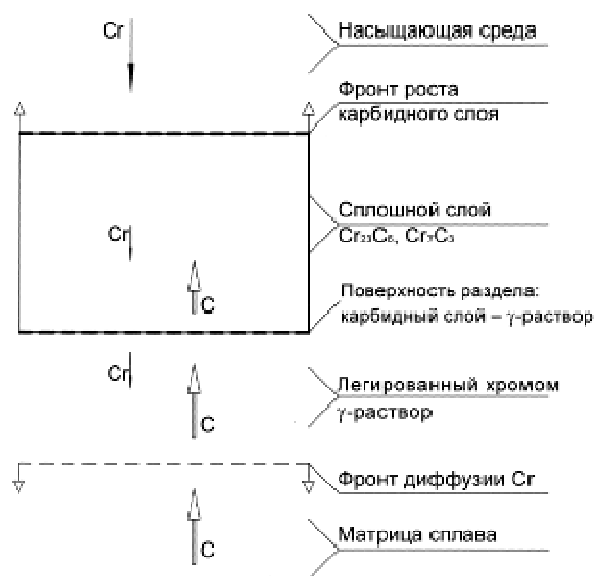


Рисунок 7 – Завершающая стадия роста, приближение к равновесию

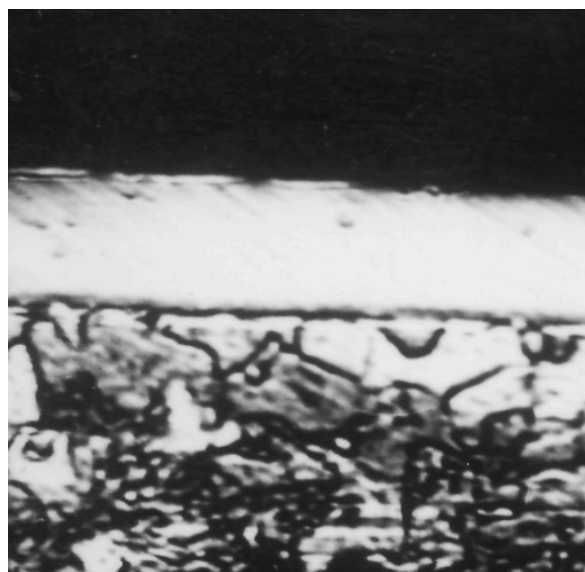


Рисунок 8 – Шлиф стали 85ГФ ( $T = 1100\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 3$  часа) – завершающая стадия роста, приближение к равновесию  $\times 750$

Детальное изучение возможных физических механизмов поверхностного легирования железоуглеродистых сплавов хромом в зависимости от скорости нагрева показало, что решающим фактором, определяющим природу легированного слоя, является плотность встречных диффузионных потоков хрома и углерода на начальном этапе легирования. А сама скорость нагрева легируемого изделия является лишь одним из многих параметров, позволяющих принципиально изменять соотношение этих потоков, относительно стехиометрически необходимого для образования карбида.

Таким образом, если диффузионный поток углерода больше, либо равен стехиометрически необходимому – зарождение карбидного слоя происходит непосредственно на поверхности легируемого сплава и не сопровождается фазовыми превращениями в его матрице.

Если диффузионный поток углерода меньше стехиометрически необходимого – на поверхности легируемого сплава происходит  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение, а зарождение карбидного слоя происходит преимущественно в зоне, затронутой превращением.

Если диффузионный поток углерода намного меньше стехиометрически необходимого – происходит обычное диффузионное насыщение легируемого сплава хромом.

При сопоставлении опытных данных, полученных при легировании стали X12МФ карбидом хрома  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  (нагрев со скоростью  $300\text{ }^\circ\text{C}/\text{час}$ ), и при попытке исправить некондиционный слой смешанных карбидов  $(\text{Cr}_x\text{Fe}_y)_{23}\text{C}_6$  на стали 45, с кинетическим обоснованием механизмов зарождения и роста карбидного слоя, был сделан вывод, о том, что:

- предложенные кинетические модели адекватно определяют возможные физические механизмы и глубину зарождения карбидного слоя для различных условий легирования;

- предложенные модели не позволяют адекватно описать химическое поведение карбидного слоя во время его зарождения и роста.

Сами факты образования химически чистого слоя карбида хрома  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ , при его зарождении в матрице стали X12МФ на глубине от 0 до 10 мкм, и дальнейшем росте до общей толщины  $\sim 30$  мкм, и рафинирования некондиционного слоя  $(\text{Cr}_x\text{Fe}_y)_{23}\text{C}_6$  до слоя состава  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  на стали 45 говорят о том, что механизм образования и роста карбидного слоя подчиняется не законам, управляющим встречной химической реакцией, приводящей к образованию термодинамически стабильного продукта, а законам совершенно другого процесса, изученного в нанотехнологии – процесса самосборки.

Согласно [20], процессы самосборки отличает высокий выход синтеза. При этом ошибки синтеза являются быстро распознаваемыми и исправляемыми. Как правило, самосборка происходит благодаря слабым, нековалентным связывающим взаимодействиям (например, водородные связи или силы Ван-дер-Ваальса), которые позволяют реакциям идти под термодинамическим контролем с непрерывным исправлением ошибок. При этом типов исходных молекул обычно немного, они небольшие и легко синтезируемые, а конечный продукт получается в термодинамически равновесном состоянии.

Первым (хотя и непрямым) свидетельством высокого выхода синтеза, нехарактерного для кинетически контролируемого процесса, явилось то, что для его объяснения в свое время потребовалось создать новую кинетическую модель [10, 11, 12], сокращенно описанную как механизм роста I. Это было вызвано тем, что результаты фундаментальных исследований [1, 7, 8, 19], и публикаций [10, 11] показали, что процесс поверхностного легирования железоуглеродистых сплавов, содержащих более  $0,2 \pm 0,03$  % углерода, хромом, действительно отличает исключительно высокий выход синтеза. Он выражается, во-первых, в образовании химически чистого беспористого карбидного слоя состава  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ , либо  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6 - \text{Cr}_7\text{C}_3 - \text{Cr}_3\text{C}_2$  – на сплавах с высоким углеродным потенциалом. При этом на суммарную массовую долю  $\text{Cr} + \text{C}$  в карбидном слое приходится более 98 %, если легирование проводилось в смесях с применением азотсодержащих активаторов, и более 99 % – с применением безазотистых. Во-вторых, в высокой степени связывания исходных компонентов, поступивших в зону реакции. В соответствии с типичными кривыми распределения концентраций хрома и углерода на



поверхностно легированной стали (рис. 9, 10), доля связанных компонентов (по отношению к полному диффузионному потоку) превышает 90 % и в отдельных случаях может достигать 98–99 %.

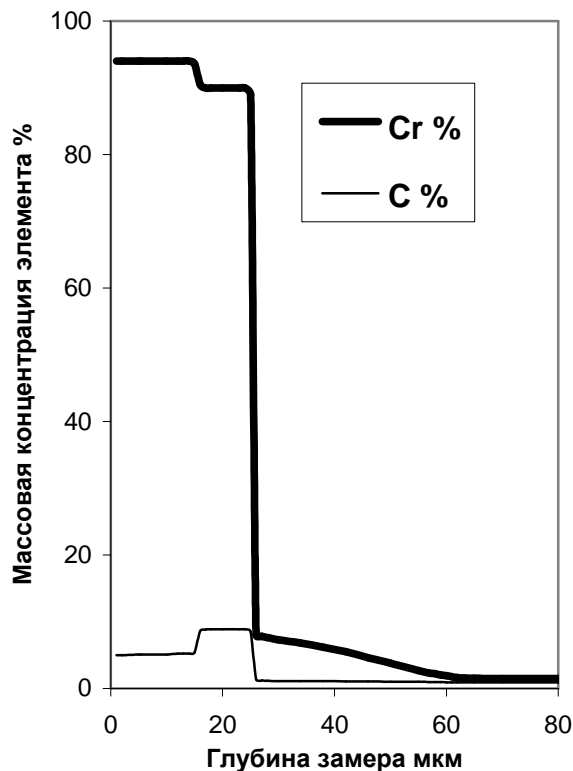


Рисунок 9 – Распределение концентрации хрома и углерода в поверхностно легированной стали ШХ15 ( $T = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 3$  часа)

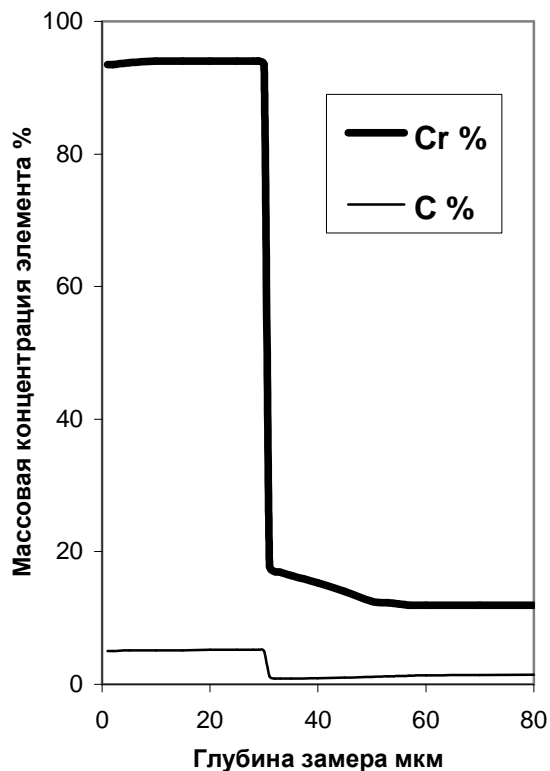


Рисунок 10 – Распределение концентрации хрома и углерода в поверхностно легированной стали X12MФ ( $T = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 5$  часов)

Однако принципиальным условием, необходимым для самоорганизации процессов зарождения и роста карбидного слоя, является относительная слабость связывающих взаимодействий, позволяющая реакциям идти под термодинамическим контролем с непрерывным исправлением ошибок. Именно некорректное (для рассматриваемой системы) представление о карбидном слое  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6 - \text{Cr}_7\text{C}_3$ , либо  $(\text{Cr}_x\text{Fe}_y)_{23}\text{C}_6$ ,  $(\text{Cr}_x\text{Fe}_y)_7\text{C}_3$ , как о термодинамически стабильном продукте, опирающееся на достоверные доказательства значительной доли ковалентной составляющей в химической связи, не позволяли выявить механизм его формирования столь длительное время.

Так, в работе [14] установлено, что с увеличением содержания углерода в карбидах хрома, снижается относительная интенсивность 1-го и повышается интенсивность 2-го максимума РЭ спектров валентной зоны (рис. 11). Это обусловлено переходом части электронов из первой полосы валентной зоны, ответственной в основном за связи Cr – Cr, в более низкоэнергетические состояния с образованием связей Cr – C. Перенос заряда от хрома к углероду способствует реализации на последнем  $sp^3$  – конфигурации, обеспечивающей ковалентно-ионную связь Cr – C. В результате в ряду Cr,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  снижается доля металлической связи и повышается доля более прочных связей Cr – C.

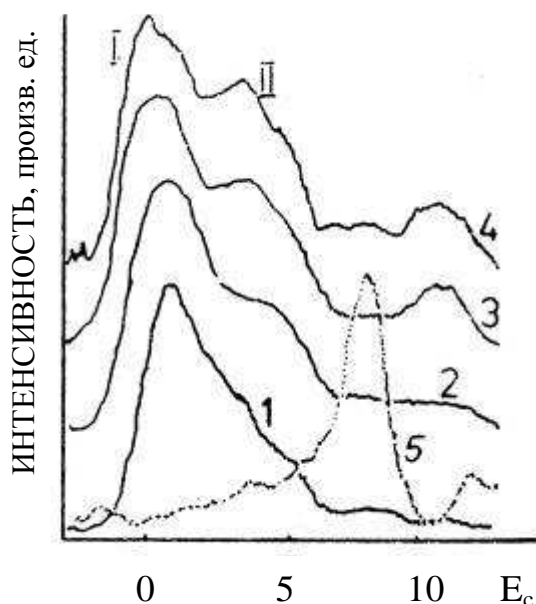
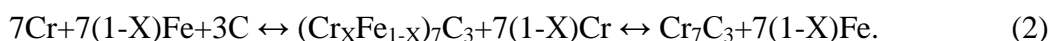
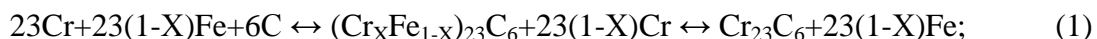


Рисунок 11 – РЭ спектры валентной зоны хрома (1),  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  (2),  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  (3),  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  (4) и углерода (5)

Сдвиг 1-го максимума (рис. 11) в сторону меньших энергий связи в ряду  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ , дополнительно свидетельствует о понижении химического потенциала соединения, и, следовательно, о повышении термодинамической устойчивости карбидов в указанном ряду.

В то же время, если сравнить удельный изобарно-изотермический потенциал образования карбидов хрома, составляющий  $\Delta G^{\circ}_{1000} = -17,2$  кДж/моль для  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\Delta G^{\circ}_{1000} = -28,9$  кДж/моль для  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ , и  $\Delta G^{\circ}_{1000} = -33,8$  кДж/моль для  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  [26, 28, 15], с диапазоном потенциалов, характерным для процессов самосборки – от 1-4 кДж/моль до 12–34 кДж/моль (для сил Ван-дер-Ваальса и водородных связей соответственно), то становится очевидно, что энергия связи Cr–C в карбидах хрома полностью ему соответствует.

Для дополнительного подтверждения относительной слабости связывающих взаимодействий в исследуемом карбидном слое, был проведен термодинамический анализ его формирования на основании данных о фазовых превращениях в железоуглеродистых сплавах легированных хромом [21, 22, 23], ферросплавах хрома [24, 25, 29] и карбидах [26, 27, 28]. Анализ показал, что в исследованном диапазоне концентраций ( $3 < \text{Cr} < 100$  %;  $0 < \text{Fe} < 97$  %;  $0,03 < \text{C} < 9$  %), при температурах поверхностного легирования (1000–1100 °C), фазовый состав систем Cr – Fe – C полностью определяется равновесием в реакциях:



Это означает, что, независимо от доли ковалентной составляющей химической связи в карбидах хрома, термодинамически-стабильных продуктов в исследуемой системе нет. При этом все фазы системы, в соответствии с диаграммой Мовчана-Демчишина, находятся в области  $0,5T_{\text{пл}} < T < T_{\text{пл}}$ , а, следовательно, способны к полной перестройке при смещении равновесия, благодаря протеканию объемной диффузии.

Более того, структурная перестройка систем Cr – Fe – C, по отношению к типичному времени выдержки при ДКПЛ, протекает с очень высокой скоростью. Например, процесс растворения избыточных карбидов в хромоуглеродистых сталях X12, 95X18, при нагреве под закалку ( $T = 950\text{--}1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), происходит за несколько минут. Обратный процесс протекает еще быстрее, лимитируя минимальную скорость охлаждения, при закалке на мартенсит [22, 23]. В то же время выдержка при ДКПЛ составляет около 5 часов. И это притом, что типичное сечение дисперсных карбидов в сталях X12, 95X18 составляет 10–25 мкм, полностью соответствуя типичному сечению карбидного слоя.

При такой относительно длительной выдержке во время поверхностного легирования, локальная система Cr – Fe – C имеет достаточно времени не только на то, чтобы отреагировать на смещение равновесия, а и на то, чтобы максимально к нему приблизиться. Это означает, что поверхностный карбидный слой  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  –  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ , либо  $(\text{Cr}_x\text{Fe}_y)_{23}\text{C}_6$  –  $(\text{Cr}_x\text{Fe}_y)_7\text{C}_3$ , действительно является продуктом, полученным в термодинамически равновесном состоянии.

Из выше изложенного следует, что образование карбидного слоя, при поверхностном легировании железоуглеродистых сплавов хромом, является самоорганизующимся затухающим процессом. Образование слоя смешанных карбидов типа  $(\text{Cr}_x\text{Fe}_y)_{23}\text{C}_6$ ,  $(\text{Cr}_x\text{Fe}_y)_7\text{C}_3$ , либо неоднородных по составу карбидных слоев, является не следствием кинетических особенностей их формирования, а следствием недостаточного, либо неоднородного химического потенциала карбидообразователя в насыщающей среде. Или, в более редких случаях, вызвано недостаточным временем выдержки, останавливающим процесс на стадиях смыкания и роста карбидного слоя (рис. 3–6). Смещение равновесия вызывает перестройку карбидного слоя. Таким образом, некондиционный слой  $(\text{Cr}_x\text{Fe}_y)_{23}\text{C}_6$ ,  $(\text{Cr}_x\text{Fe}_y)_7\text{C}_3$  может быть превращен в слой  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  –  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ , при увеличении химического потенциала карбидообразователя в насыщающей среде, и наоборот. По этой же причине слой смешанных карбидов, неизбежно образующийся при зарождении и росте в матрице (механизм роста II), полностью рафинируется на завершающей стадии самоорганизации – приближении к равновесию.

#### Выводы

1. Разработана нанотехнология диффузионного карбидного поверхностного легирования железоуглеродистых сплавов, обеспечивающая формирование поверхностного карбидного слоя толщиной 5–50 мкм со скоростью 1–5 нм/сек.

2. На основании результатов физических и металлографических исследований установлено, что физический механизм поверхностного легирования железоуглеродистых сплавов хромом принципиально зависит от плотности встречных диффузионных потоков хрома и углерода на начальном этапе легирования.

3. Если диффузионный поток углерода больше, либо равен стехиометрически необходимому – на поверхности легируемого сплава происходит образование карбидного слоя. При этом зарождение карбидного слоя происходит непосредственно на поверхности легируемого сплава и не сопровождается фазовыми превращениями в его матрице.

4. Если диффузионный поток углерода меньше стехиометрически необходимого – на поверхности легируемого сплава происходит  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение. При этом зарождение карбидного слоя происходит преимущественно в зоне, затронутой превращением, и при условии приближения плотности диффузионных потоков к стехиометрически необходимой – завершается образованием карбидного слоя.

5. Если диффузионный поток углерода намного меньше стехиометрически необходимого – происходит обычное диффузионное насыщение легируемого сплава хромом.

6. При адекватной плотности встречных диффузионных потоков хрома и углерода образование карбидного слоя на поверхности легируемого сплава является самоорганизующимся затухающим процессом, а сформировавшийся слой – термодинамически равновесным.

7. Причиной образования неоднородных по составу карбидных слоев типа  $(Cr_xFe_y)_{23}C_6$ ,  $(Cr_xFe_y)_7C_3$ , является не механизм их формирования, а недостаточный химический потенциал хрома на границе раздела: карбидный слой – насыщающая среда.

### Литература

1. Колотыркин Я.М., Заец И.И., Зайцев И.Д. и др. Открытие, диплом №368 от 13 июля 1989 г. // Б.И. 1990. №4. С. 3.

2. Товажнянский Л.Л., Чуняев О.Н., Асриян А.А. Новое термическое оборудование для технологии ДКПЛ // Физико-химическая механика материалов. – Львов. – 2004. – №4, Т.2.

3. Товажнянский Л.Л. Чуняева Л.О., Чуняев О.Н. Патент США №60/353,626 Counter-rotating tunnel furnace // Заявл. 31.01.2002.

4. Чуняева Л.О., Заец И.И., Чуняев О.Н. Патент США №60/353,542 Production line and method for continuous Diffusion Surface Alloying and Diffusion Carbide Surface Alloying // Заявл. 31.01.2002.

5. Чуняева Л.О. Колотыркин Я.М., Ткач Г.А., Новаковский В.М. Состав для комплексного диффузионного насыщения стальных изделий // А.с. N1686032 СССР Заявл. 20.06.1989; Оpubл. 22.06.1991.

6. Чуняева Л.О. Заец И.И., Ткач Г.А. Method and composition for diffusion alloying of ferrous materials // Пат. 6197436 В1 США, МКИ С 23 С 16/30 Заявл. 07.05.1998; Оpubл. 06.03.2001.

7. Дубинин Г.Н. Диффузионное хромирование сплавов. – М.: Машиностроение, 1964. – 451 с.

8. Минкевич А.Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. – М.: Машиностроение, 1965. – 389 с.

9. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.

10. Чуняева Л.О., Новаковский В.М. Теоретическая оценка возможности смыкания карбидной фазы в поверхностных слоях диффузионно-хромируемой стали // Защита металлов. – М., 1992. – Т.28, № 6.

11. Чуняева Л.О. Кинетика насыщения углеродистых сталей карбидом хрома // Защита металлов. – М., 2001. – Т.37, № 1.

12. Чуняева Л.О. Отличительные особенности математического описания процесса противокоррозионного легирования карбидообразователями // Вестник ХГПУ – Харьков, 1999. – Вып.28.

13. Мельник П.И. Диффузионное насыщение железа и твердофазные превращения в сплавах. – М.: Металлургия, 1993. – 128 с.

14. Бабич С.Г. Коррозионно-электрохимические свойства карбидов и нитрида хрома и их влияние в качестве избыточных фаз на коррозионное поведение нержавеющей

щих сталей. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата химических наук. – НИФХИ им. Л.Я. Карпова, 1988. 24с.

15. Чуняев О.Н. Массоперенос при химико-термической обработке железоуглеродистых сплавов с использованием хлоридных активаторов в камерных печах. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Харьков, НТУ «ХПИ», 2006. 20с.

16. Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов в активизированных газовых средах. – М.: Машиностроение, 1979.– 225 с.

17. Металлизация сталей и сплавов в вакууме / Е.П. Пономаренко, А.И. Плышевский, В.К. Супрунчук, Ю.К. Белов / Под. ред. Е.П. Пономаренко.–К.: Техніка, 1974.– 296 с.

18. Товажнянський Л.Л., Чуняєв О.М., Чуняєва Л.О. Термодинаміка процесу дифузійного карбідного поверхневого легування. // Фізико-хімічна механіка матеріалів – Львів, 2006. №5, С. 568–573.

19. Мельник П.И. Технология защитных покрытий.– К.: Техника, 1978.– 151 с.

20. Ч.Пул, Ф.Оуэнс. Нанотехнологии. – М.: Техносфера, 2005.– 336 с.

21. Могутнов Б.М., Томилин И.А., Шварцман Л.А. Термодинамика железоуглеродных сплавов. – М.: Металлургия, 1972.– 328 с.

22. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. 5-е изд. – М.: Металлургия, 1983.– 527 с.

23. Раузин Я.Р. Термическая обработка хромистой стали. 4-е изд. – М.: Машиностроение, 1978.– 277 с.

24. Мизин В.Г., Чирков Н.А, Игнатъев В.С., Ахманаев С.И., Поволоцкий В.Д. Ферросплавы. Справочник. – М.: Металлургия, 1992.– 415 с.

25. Гасик М.И., Лякишев Н.П., Емлин Б.И. Теория и технология производства ферросплавов. – М.: Металлургия, 1988.– 784 с.

26. Куликов И.С. Термодинамика карбидов и нитридов: Справочник. – Челябинск: Металлургия, 1988.– 320 с.

27. Болгар А.С., Турчанин А.Г., Фесенко В.В. Термодинамические свойства карбидов. – К.: Наукова думка, 1973.– 277 с.

28. Косолапова Т.Я. Карбиды. – М.: Металлургия, 1968.– 300 с.

29. Салли А. Хром: пер. с англ. – М.: Металлургия, 1958.– 291 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Kolotyirkin Ya.M., Zaets I.I., Zaytsev I.D. i dr. Otkryitie, diplom #368 ot 13 iyulya 1989 g. В.І. 1990. #4. p. 3.

2. Tovazhnyanskiy L.L., Chunyaev O.N., Asriyan A.A. Novoe termicheskoe oborudova-nie dlya tehnologii DKPL Fiziko-himicheskaya mehanika materialov. –Lvov.– 2004.–#4,Т.2.

3. Tovazhnyanskiy L.L. Chunyaeva L.O., Chunyaev O.N. Patent SShA #60/353,626 Counter-rotating tunnel furnace Zayavl. 31.01.2002.

4. Chunyaeva L.O., Zaets I.I., Chunyaev O.N. Patent SShA #60/353,542 Production line and method for continuous Diffusion Surface Alloying and Diffusion Carbide Surface Alloying Zayavl. 31.01.2002.

5. Chunyaeva L.O. Kolotyirkin Ya.M., Tkach G.A., Novakovskiy V.M. Sostav dlya kompleksnogo diffuzionnogo nasyischeniya stalnyih izdeliy A.s. N1686032 SSSR Zayavl. 20.06.1989; Opubl. 22.06.1991.

6. Chunyaeva L.O. Zaets I.I., Tkach G.A. Method and composition for diffusion alloying of ferrous materials Pat. 6197436 B1 SShA, MKI S 23 S 16/30 Zayavl. 07.05.1998; Opubl. 06.03.2001.
7. Dubinin G.N. Diffuzionnoe hromirovanie splavov. – M.: Mashinostroenie, 1964. – 451 p.
8. Minkevich A.N. Himiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov.– M.: Mashinostroenie, 1965.– 389 p.
9. Lahtin Yu.M., Arzamasov B.N. Himiko-termicheskaya obrabotka metallov. – M.: Metallurgiya, 1985.– 256 p.
10. Chunyaeva L.O., Novakovskiy V.M. Teoreticheskaya otsenka vozmozhnosti smyika-niya karbidnoy fazyi v poverhnostnyih sloyah diffuzionno-hromiruemy stali Zashchita metallov.– M.,1992.– T.28, # 6.
11. Chunyaeva L.O. Kinetika nasyischeniya uglerodistyih staley karbidom hroma Zashchita metallov.– M.,2001.– T.37, # 1.
12. Chunyaeva L.O. Otlichitelnyie osobennosti matematicheskogo opisaniya protsessa protivokorroziionnogo legirovaniya karbidoobrazovatelyami Vestnik HGPU–Harkov,1999.– Vyip.28.
13. Melnik P.I. Diffuzionnoe nasyischenie zheleza i tverdogaznyie prevrascheniya v splavah. – M.: Metallurgiya, 1993.– 128 p.
14. Babich S.G. Korroziionno-elektrohimicheskie svoystva karbidov i nitrida hroma i ih vliyanie v kachestve izbyitochnyih faz na korroziionnoe povedenie nerzhaveyuschih staley. Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata himicheskikh nauk. – NIFHI im. L.Ya. Karpova, 1988. 24 p.
15. Chunyaev O.N. Massoperenos pri himiko-termicheskoy obrabotke zhelezouglerodistyih splavov s ispolzovaniem hlorigidnyih aktivatorov v kamernyih pechah. Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tehnikeskikh nauk. – Harkov, NTU «HPI», 2006. 20 p.
16. Arzamasov B.N. Himiko-termicheskaya obrabotka metallov v aktivizirovannyih gazovyih sredah. – M.: Mashinostroenie, 1979.– 225 p.
17. Metallizatsiya staley i splavov v vakuume E.P. Ponomarenko, A.I. Plyishevskiy, V.K. Suprunchuk, Yu.K. Belov Pod. red. E.P. Ponomarenko.–K.: Tehnika, 1974.– 296 p.
18. Tovazhnyanskiy L.L., Chunyaev O.M., Chunyaeva L.O. Termodinamika protsesu difuziynogo karbidnogo poverhnevogo leguvannya. Fiziko-himichna mehanika materialiv – Lviv, 2006. #5, p. 568–573.
19. Melnik P.I. Tehnologiya zashchitnyih pokrytiy.– K.: Tehnika, 1978.– 151 p.
20. Ch.Pul, F.Ouens. Nanotehnologii. – M.: Tehnosfera, 2005.– 336 p.
21. Mogutnov B.M., Tomilin I.A., Shvartsman L.A. Termodinamika zhelezouglerodnyih splavov. – M.: Metallurgiya, 1972.– 328 p.
22. Geller Yu.A. Instrumentalnyie stali. 5-e izd. – M.: Metallurgiya, 1983.– 527 p.
23. Rauzin Ya.R. Termicheskaya obrabotka hromistoy stali. 4-e izd. – M.: Mashinostroenie, 1978.– 277 p.
24. Mizin V.G., Chirkov N.A, Ignatev V.S., Ahmanaev S.I., Povolotskiy V.D. Ferrosplavyi. Spravochnik. – M.: Metallurgiya, 1992.– 415 p.
25. Gasik M.I., Lyakishev N.P., Emlin B.I. Teoriya i tehnologiya proizvodstva ferrosplavov. – M.: Metallurgiya, 1988.– 784 p.
26. Kulikov I.S. Termodinamika karbidov i nitridov: Spravochnik. – Chelyabinsk: Metallurgiya, 1988.– 320 p.

27. Bolgar A.S., Turchanin A.G., Fesenko V.V. Termodinamicheskie svoystva karbidov. – K.: Naukova dumka, 1973.– 277 p.  
28. Kosolapova T.Ya. Karbidyi. – M.: Metallurgiya, 1968.– 300 p.  
29. Salli A. Hrom: per. s angl. – M.: Metallurgiya, 1958.– 291 p.

УДК 620.193.01

Товажнянський Л.Л., Чуняєв О.М., Заєць І.І., Чуняєва Л.О.

**НАНОТЕХНОЛОГІЇ В ХІМІКО-ТЕРМІЧНІЙ ОБРОБЦІ  
ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ**

В роботі досліджені фізичні механізми поверхневого легування залізовуглецевих сплавів хромом. Доведено, що за умов адекватної щільності зустрічних дифузійних потоків хрому та вуглецю, формування карбідного шару йде шляхом самозборки.

УДК 621.391

Сорока Л.С., Рассомахин С.Г.

**ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУНЕПРЕРЫВНЫХ СИГНАЛОВ  
ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧАСТОТНО-  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕСУРСА КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В АСУ**

Основными характеристиками процесса управления и информационного обмена любой АСУ являются быстродействие, помехоустойчивость, стоимость и показатели удельной эффективности использования каналов передачи данных. Повсеместное внедрение беспроводных технологий и стремительное развитие городских сетей делают актуальной задачу минимизации частотно-энергетического ресурса, необходимого для удаленного взаимодействия абонентов открытых систем. В сложных условиях электромагнитной совместимости все чаще приходится сталкиваться с ситуацией, когда объем физических переносчиков информации – сигналов, превышает выделенную емкость каналов. В этих условиях необходим поиск новых способов представления и передачи информации, которые следует искать на пути совместного рассмотрения источников и каналов [1] для получения сжатых помехоустойчивых сигнальных конструкций.

Обобщенной технической характеристикой любого сигнала является его объем  $V_c = D_c T_c F_c$ , где  $D_c$  – мощность,  $T_c$  – длительность,  $F_c$  – полоса занимаемых частот сигнала. Аналогичной характеристикой выделяемого канала является его емкость  $V_k = D_k T_k F_k$ . Осуществление передачи информации в условиях жесткого ограничения физического ресурса соответствует случаю, когда  $V_c > V_k$ . Рассмотрим одно из возможных решений такой задачи при передаче гауссова непрерывного случайного сигнала  $c(t)$  с эффективно ограниченным в полосе  $F_c$  спектром по стационарному каналу, обладающему эффективной шириной полосы пропускания  $F_k < F_c$ , в условиях действия аддитивного белого гауссова шума (АБГШ). При этом объективным показателем качества процесса передачи является величина относительной дисперсии ошибки восстановления  $D = \frac{1}{D_c} D [c(t) - c^*(t)]$ .

Минимально достижимая величина  $D$  определена фундаментальным пределом [2]:

$$\min \langle D \rangle = (1+h)^{-F_k/F_c}, \quad h = \frac{D_c}{D_\xi}, \quad (1)$$

где  $h$  – отношение сигнал/шум в канале;  $D_\xi = N_0 \cdot F_k$  – мощность АБГШ в полосе канала;  $N_0$  – спектральная плотность мощности АБГШ.

Алгоритм построения сигнальной конструкции, рассматриваемый ниже, позволяет асимптотически приближаться к следующей границе, полученной на основе (1)

$$\min \langle D' \rangle = \left[ (1 + K_v \cdot h)^{1/K_v} - 1 \right]^{-1}, \quad (2)$$



где  $K_V = \frac{F_c}{F_k}$  – коэффициент сжатия объема сигнала. Формула (2) показывает, что если, например, объем сигнала превышает емкость выделенного канала в 2 раза, то при достаточно большом отношении сигнал/шум ( $h > 20$  дБ), относительная дисперсия ошибки при передаче не превысит 8 %. Подобная пропорция является чрезвычайно выгодной для случаев, когда получателю сообщений не требуется абсолютно точное воспроизведение формы переданных непрерывных сигналов (например, при передаче речевых сообщений). Процедура синтеза сигнальных конструкций для условий жестких ограничений частотно-энергетического ресурса основана на результатах доказательства теоремы о локализованных отсчетах [3, 4]. В соответствии с этой теоремой допускается воспроизведение непрерывных функций, обладающих конечной мощностью и спектром, с контролируемой (сколь угодно малой) погрешностью по результатам фрагментарных наблюдений отрезков их интервальных разложений в произвольном ортогональном базисе. Композиция и временное масштабирование фрагментов разложений используются для получения отрезков полунепрерывных конструкций, описываемых следующим выражением

$$x(t) = \frac{Y_0}{2} + \sum_{m=1}^Q \left[ Y_m \cdot \cos\left(m \cdot \frac{2\pi}{N \cdot M \cdot T_c} \cdot t\right) + Y_{m+Q} \cdot \sin\left(m \cdot \frac{2\pi}{N \cdot M \cdot T_c} \cdot t\right) \right] \times \\ \times [\Phi(t) - \Phi(t - N \cdot M \cdot T_c)] , \\ X(t) = x(t \cdot M) \quad (3)$$

где  $Q = \frac{N(2B+1)}{2}$  – порядок интервального разложения в гармоническом базисе;  $N$  – число объединяемых в конструкции отрезков  $T_c$  исходного сигнала;  $B$  – база сигнала на отрезке разложения  $T_c$ ;  $M$  – коэффициент временного масштабирования отрезков, использованных в конструкции;  $Y_i, i = \overline{0, Q}$  – коэффициенты Фурье;  $\Phi(t)$  – функции Хевисайда.

Построение цепочки последовательных отрезков для полной длительности  $T$  передаваемой непрерывной функции  $\sum_{t \in T} X(t)$ , описываемых преобразованием (3),

обеспечивает получение конструкции, принадлежащей классу полунепрерывных сигналов. При этом часть информативных параметров (амплитудные коэффициенты Фурье) принадлежат непрерывному континууму, в то время как остальные параметры (число гармоник разложения и длительность отрезков) дискретны.

Задачей обработки сжатой по спектру сигнальной конструкции при приеме на фоне АБГШ является восстановление полной длительности отрезков интервальных разложений  $x(t)$  после соответствующей компрессии во времени, а также построение сглаженной исходной непрерывной формы огибающей исходного сигнала. Обработка производится по результатам дискретных измерений  $z(t_i) = X(t_i) + \xi(t_i)$  (второе слагаемое определяет отсчеты АБГШ), при этом для исключения внеполосных по отношению к форме (3) помех, осуществляется фильтрация с использованием БДПФ. Для восстановления отрезков разложений исходного сигнала производится решение  $N$  систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) следующего вида

$$\begin{aligned}
 & A \cdot \bar{Y} = \bar{B}; \\
 & A_{k,0} = \frac{1}{2}, \quad A_{k,j} = \text{Cos} \left( j \cdot \frac{2\pi}{T_c} \cdot t_k \right), \quad A_{k,j+B} = \text{Sin} \left( j \cdot \frac{2\pi}{T_c} \cdot t_k \right); \\
 & B_k = z(t_k), \quad k = 0 \dots 2 \cdot B, \quad j = 1 \dots B.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Найденный вектор коэффициентов интервальных разложений  $\bar{Y}$  определяет восстановление последовательности отрезков  $T_c$  исходного сигнала. Заключительной операцией является фильтрация на интервале  $T$  в полосе  $F_c$  с использованием БДПФ. Это позволяет устранить разрывы огибающей на границах интервалов разложений, возникающие с периодом  $T_c$ .

Максимальная помехоустойчивость конструкции достигается при минимальных значениях базы разложения  $B \leq 2$ . При этом, в отличие от методов оптимального приема дискретных сигналов, решается задача оценивания параметров  $\bar{Y}$  на фоне АБГШ. Можно показать [5], что относительная мощность ошибки восстановления, возникающей из-за помех в канале, при использовании сигнальных конструкций (3) определяется амплитудно-частотной характеристикой алгоритма преобразования (4) и вычисляется на основе эмпирического выражения

$$D = \Delta_{\min} + K_h \cdot h^{-1}, \tag{5}$$

где

$$h = \frac{1}{N \cdot T_c} \int_0^{N \cdot T_c} X(t)^2 dt \cdot (N_0 F_c)^{-1}; \tag{6}$$

$\Delta_{\min}$  – мощность ошибки интервального представления;  $K_h$  – коэффициент усиления помехи, причем  $K_h \approx 4$  для  $B = 1$  и  $K_h \approx 83$  для  $B = 2$ .

На рис.1 представлены результаты расчета относительной дисперсии ошибки восстановления при использовании полунепрерывных сигнальных конструкций в сравнении с традиционными способами передачи.

На рисунке использована следующая нумерация зависимостей: 1 – фундаментальный предел (1); 2 – предел для полунепрерывных конструкций (2); 3 – относительная дисперсия ошибки, определяемая (5); 4 – дисперсия ошибки при аналоговой передаче с ограничением спектра исходного сигнала; 5,6 и 7 – дисперсия ошибки при использовании импульсно-кодовой модуляции (ИКМ) и ансамблей сигналов с квадратурной амплитудно-фазовой модуляцией (КАФМ) с числом сигнальных точек, соответственно равным  $2^6$ ,  $2^{12}$  и  $2^{18}$ . Анализ зависимостей позволяет сформулировать следующие выводы: в диапазоне значений  $h = 10^{-1} \div 10^{-3}$  применение сигнальных конструкций (СК) (3) позволяет обеспечить среднюю мощность ошибки восстановления, близкую к предельно достижимой; выигрыш по уменьшению мощности ошибки при использовании СК по сравнению с аналоговой передачей составляет  $\Delta D > 10$  дБ; энергетический выигрыш СК по сравнению с ИКМ при использовании КАФМ- $2^{18}$   $\Delta h > 20$  дБ.

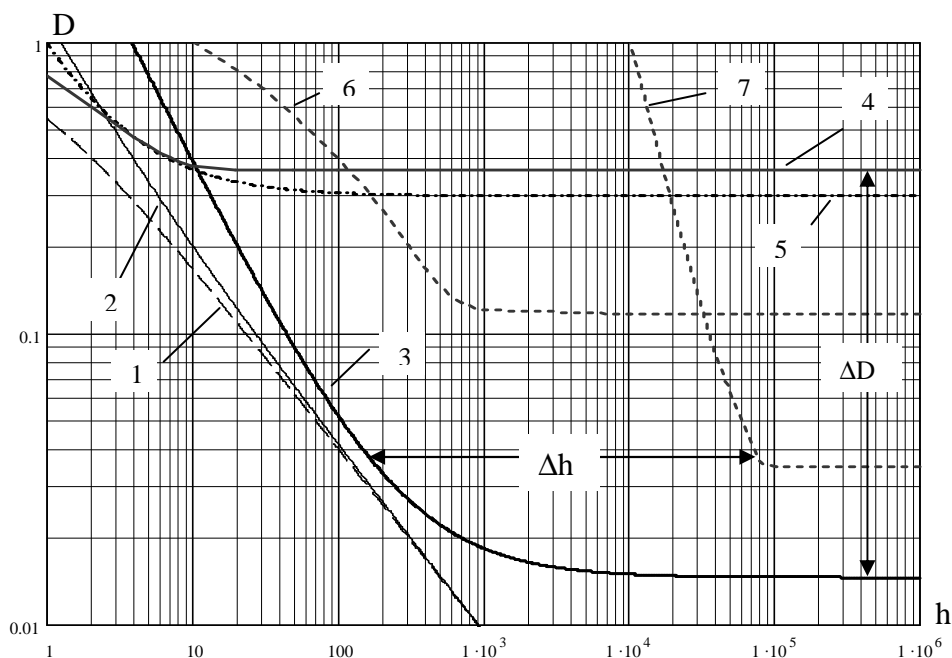


Рисунок 1 – Сравнительная оценка относительной мощности ошибки восстановления

Следовательно, применение полунепрерывных сигналов и СК является достаточно эффективным средством для повышения частотно-энергетической эффективности передачи информации аналоговых источников при жестких ограничениях физического ресурса каналов связи сетей АСУ.

#### Литература

1. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / Под ред. А.Г. Зюко.– М.: Радио и связь, 1985.– 272 с.
2. Уайнер А.Д. Фундаментальные пределы в теории информации // ТИИЭР, т. 69, № 2, 1981. – С. 117–132.
3. Сорока Л.С. Основы теории минимально-избыточных сигналов. Математические методы и средства обработки: Монография.– Х.: МОУ, ОНИИ ВС, 2005.– 280 с.
4. Сорока Л.С. Теорема о локализованных отсчётах и её применение для получения сжатых представлений сигналов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи.– 2005.– №4.– С. 116–119.
5. Сорока Л.С. Применение клонирующих преобразований для получения сжатых форм сигналов // Системи обробки інформації.– Х.: ХУ ПС.–2005.–Вип. 8(48).–С. 190–194.

#### Bibliography (transliterated)

1. Pomehoustoychivost i effektivnost sistem peredachi informatsii Pod red. A.G. Zyuko.- M.: Radio i svyaz, 1985.-272 p.
2. Uayner A.D. Fundamentalnyie predelyi v teorii informatsii TIIER, t. 69, # 2, 1981. - S. 117-132.
3. Soroka L.S. Osnovy teorii minimalno-izbytochnyih signalov. Matematicheskie metody i sredstva obrabotki: Monografiya.– H.: MOU, ONII VS, 2005.– 280 p.
4. Soroka L.S. Teorema o lokalizovannyih otschyotah i eyo primenenie dlya polucheniya szhatyih predstavleniy signalov Radioelektronni i komp'yuterni sistemi.– 2005.– #4.– p. 116–119.

5. Soroka L.S. Primenenie kloniruyuschih preobrazovaniy dlya polucheniya szhatyih form signalov Sistemi obrobki Informatsiyi.– Н.: НУ PS.–2005.–Vip. 8(48).–р. 190–194.

УДК 621.391

Сорока Л.С., Рассомахін С.Г.

**ЗАСТОСУВАННЯ НАПІВБЕЗПЕРЕРВНИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ  
ВИКОРИСТАННЯ ЧАСТОТНО-ЕНЕРГЕТИЧНОГО РЕСУРСУ  
КАНАЛІВ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В АСК**

Розглянутий метод побудови сигнальних конструкцій, які комбінують застосування дискретних і аналогових способів модуляції на основі розкладань на інтервалах в ортогональному базисі відрізків безперервних сигналів. Показані переваги методу в порівнянні з традиційними сигналами в умовах жорстких обмежень фізичного ресурсу каналів зв'язку.

### ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕДАЧИ ПОЗИЦИОННЫХ КОДОВ СИГНАЛАМИ С КОМБИНИРОВАННОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Одной из наиболее распространенных задач распределенных автоматизированных систем управления (АСУ) является оперативный обмен цифровой измерительной информацией между органами и объектами управления. При этом передача числовых данных осуществляется при помощи позиционных кодов (измерений), выполненных в дискретные моменты времени и представленных числами конечной разрядности (импульсно-кодовая модуляция). Основным показателем качества функционирования системы цифровой передачи позиционных кодов (СЦПК) является средняя относительная мощность ошибки восстановления чисел на выходе демодулятора. Факторами, снижающими точность функционирования СЦПК, являются ошибки измерений и помехи каналов связи. В условиях ограниченного частотно-энергетического ресурса физических трактов передачи информации второй фактор приобретает доминирующее значение. Хотя сама по себе задача обеспечения требуемых значений показателей качества таких систем не нова [1, 2], однако до сих пор не существует ее универсального решения в условиях ограниченного ресурса. Кроме того представляет интерес оптимизация параметров СЦПК на основе совместного рассмотрения кодирования источника и канала при использовании активно внедряемых в мобильных сетях третьего и четвертого поколений [3] сигналов с комбинированными видами модуляции.

Наибольшее распространение, благодаря сочетанию ряда положительных свойств, получили методы модуляции на основе частотного разделения с мультиплексированием OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [4]. Групповой сигнал OFDM, является композицией нескольких колебаний несущих частот, которые присутствуют в спектре одновременно и используют собственную модуляцию по фазе. Такой сигнал может рассматриваться, как несколько параллельных каналов или как многоосновной сигнал для кодированной передачи одновременно нескольких двоичных символов потока данных. Для рассматриваемого случая удобно использовать структуру OFDM для передачи многоуровневых (в двоичном представлении) позиционных кодов чисел за один интервал модуляции.

Математическое описание произвольного OFDM сигнала имеет вид:

$$S_j(t) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i \cdot \sin \left\{ (f_n + i) \cdot t + r_{i,j} \cdot \frac{2\pi}{m} \right\}, \quad t \in \overline{0, T}, \quad (1)$$

где  $N$  – число несущих частот;  $f_n$  – значение наименьшей несущей частоты;  $r_{i,j}$  –  $j$ -ый модуляционный фазовый сдвиг на  $i$ -ой несущей частоте;  $m$  – кратность фазовой манипуляции;  $a_i$  – амплитуда  $i$ -ой несущей;  $T$  – длительность интервала модуляции. При использовании четырехкратной ФМ:  $m = 4$ ,  $r_{i,j} \in \overline{0, 3}$ . Как следует из (1), интервал между несущими частотами в спектре сигнала для обеспечения их ортогональности составляет  $\Delta f = 1/T$ .

В традиционном применении амплитуды всех несущих колебаний одинаковы:  $a_i = a$ ,  $i = 0, \dots, N-1$ . Тогда, с учетом того, что на каждой из несущих частот осуществляется передача двух бит, энергия сигнала, приведенная к одному биту, составляет

$$E = a^2 \cdot \left(\frac{T}{4}\right). \quad (2)$$

OFDM сигналы, если их рассматривать как реализации многоосновных сигналов одного ансамбля, являются взаимно зависимыми, т.к. элементы соответствующей ковариационной матрицы  $\|\rho_{ij}\|$  принимают значения в диапазоне от минус до плюс единицы с шагом дискретности, обратно пропорциональным мощности ансамбля. Собственно ковариационная матрица обладает рангом  $\text{rank}\|\rho_{ij}\| = 2 \cdot N$ , что соответствует количеству корреляторов в схеме оптимального когерентного приемника, который реализует потенциальную помехоустойчивость обработки. Это означает, что поэлементный прием с использованием отдельной решающей схемы для каждой квадратурной составляющей на всех несущих частотах обеспечит в условиях аддитивного белого шума со спектральной плотностью мощности  $N_0$  наименьшую возможную величину вероятности приема с ошибкой в расчете на один бит, совпадающую с соответствующей вероятностью для противоположных сигналов [2]:

$$p = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\sqrt{2E/N_0}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx. \quad (3)$$

В условиях рассматриваемой задачи для передачи каждого значащего разряда позиционного кода числа, представленного в двоичной форме, отводится отдельная квадратурная составляющая на каждой из частот. При этом если  $n$  – разрядность позиционного кода, то для передачи числа за один интервал модуляции необходимо  $N = \lceil n/2 \rceil$  несущих частот. Для модели двоичного симметричного канала без памяти [2], характеризуемого переходной вероятностью  $p$ , средняя нормированная мощность ошибки восстановления может быть вычислена из выражения

$$D = \sum_{i=1}^n \left( C_{n-1}^{i-1} p^i (1-p)^{n-i} \sum_{j=1}^n 2^{2(n-j)} \right), \quad (4)$$

где вероятность  $p$  вычисляется для одного разряда позиционного числа на основании (3) в предположении равной энергии (2), затрачиваемой на передачу каждого из  $n$  двоичных разрядов кода. В дальнейшем будем предполагать нормировку  $E = 1$ , при этом амплитуда несущих колебаний сигнала (1) составит  $a = 2 \cdot T^{-0,5}$ .

Естественным способом уменьшения величины  $D$  может являться учет неравенства весов разрядов чисел, вследствие которого искажения старших разрядов приводят к большей относительной ошибке восстановления, чем аналогичные искажения в младших позициях числа. Если осуществить перераспределение энергии между квадратурными компонентами на несущих частотах  $E_0, E_1, \dots, E_{n-1}$ , соблюдая требование

$$\sum_{i=0}^{n-1} E_i = n, \quad (5)$$

то при неизменных энергетических затратах на передачу и соответствующей оптимальной пропорции этого перераспределения можно добиться наименьшего значения сред-

ней мощности ошибки. В этом случае нормированная дисперсия ошибки восстановления составит

$$\begin{aligned}
 D' = & \sum_{i_0=0}^{n-1} \left\{ \left[ \prod_{k=0}^0 p_{i_k} \right] \cdot \left[ \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i_0}}^{n-1} [1 \cdot (1-p_j)] \right] \cdot \left[ \sum_{\ell=0}^0 2^{2 \cdot i_0} \right] \right\} + \\
 & + \sum_{i_0=0}^{n-2} \sum_{i_1=i_0+1}^{n-1} \left\{ \left[ \prod_{k=0}^1 p_{i_k} \right] \cdot \left[ \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i_0, i_1}}^{n-1} [1 \cdot (1-p_j)] \right] \cdot \left[ \sum_{\ell=0}^1 2^{2 \cdot i_\ell} \right] \right\} + \\
 & + \dots + \left[ \prod_{k=0}^{n-1} p_k \right] \cdot \left[ \sum_{\ell=0}^{n-1} 2^{2 \cdot \ell} \right],
 \end{aligned} \tag{6}$$

где  $p_i$ ,  $i = \overline{0, n-1}$  определяются выражением (3) при  $E = E_i$ .

В предположении возможности только однократных ошибок на длине кодового слова  $n$  выражение (6) может быть упрощено

$$D'' = \sum_{i=0}^{n-1} \left\{ p_i \cdot \left[ \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n-1} [1 \cdot (1-p_j)] \right] \cdot 2^{2 \cdot i} \right\}. \tag{7}$$

Задача оптимального распределения энергии между квадратурными компонентами несущих частот формулируется следующим образом: найти вектор  $\bar{E} = \{E_0, E_1, \dots, E_{n-1}\}$ , обеспечивающий минимум целевой функции  $C = \min [D'(\bar{E})]$  при ограничении (5). Результаты решения данной задачи численным методом при  $n = 8$  в зависимости от нормированного отношения сигнал/шум  $h = (N_0)^{-1}$  показаны на рис. 1.

На рис. 1 "а" показаны зависимости нормированной дисперсии ошибки восстановления при обычной передаче  $D$  (4), при оптимальном распределении энергии  $D'$  (6), а также при оптимизации по приближенной формуле  $D''$  (7). Выигрыш по уменьшению величины средней нормированной мощности ошибки восстановления составляет 10 ÷ 15 дБ. Использовать приближенную формулу (7) для упрощения задачи оптимизации можно только при значениях  $h > 5 \div 6$ , т.к. для плохих каналов она дает слишком оптимистичную оценку дисперсии ошибки.

Рис. 1 "б" иллюстрирует оптимальное распределение энергии между разрядами двоичного числа. С ухудшением канала дифференциация энергии возрастает. Кроме того, данный рисунок позволяет констатировать, что при  $h < 2$  передача младших (в данном примере нулевого и первого) разрядов числа не имеет смысла:  $E_0 \approx E_1 \approx 0$ . За счет их устранения можно повысить частотную эффективность процесса передачи чисел, сократив на единицу количество несущих частот в составе сигнала.

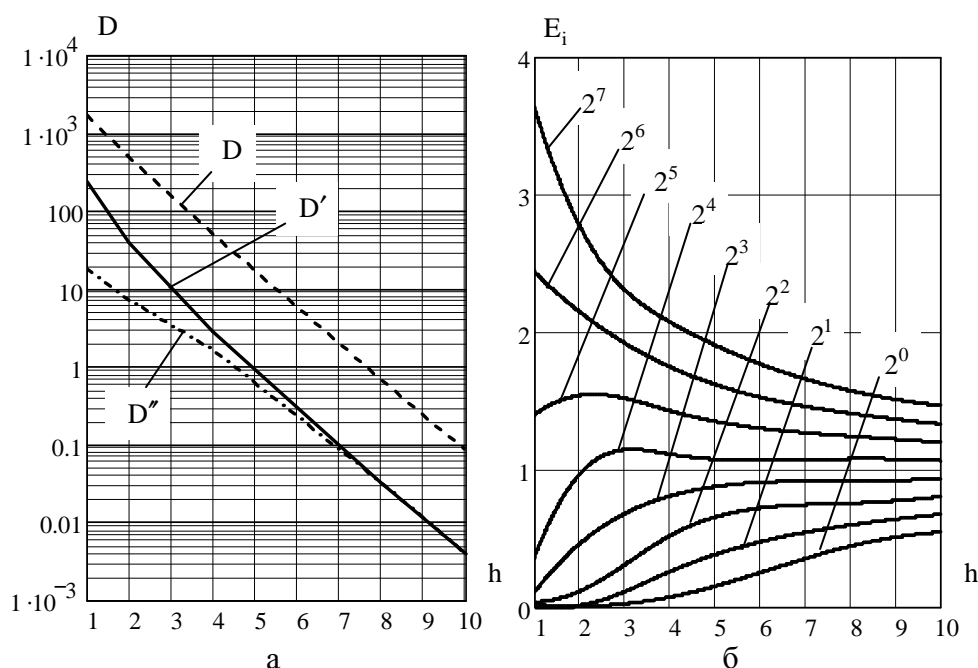


Рисунок 1 – Иллюстрация результатов решения оптимизационной задачи

Полученные при решении оптимизационной задачи результаты свидетельствуют о возможности существенного повышения качества передачи позиционных чисел без дополнительных энергетических и частотных затрат на основе применения OFDM сигналов с дополнительной амплитудной модуляцией квадратурных компонент.

#### Литература

1. Величкин А. И. Теория дискретной передачи непрерывных сообщений. М.: Сов. радио, 1970. – 296 с.
2. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации/ Под ред. А. Г. Зюко.– М.: Радио и связь, 1985.– 272 с.
3. Григорьев В. А., Лагутенко О. И., Распаев Ю. А. Сети и системы радиодоступа. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 384 с.
4. Волков Л. Н., Немировский М. С., Шинаков Ю. С. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 392 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Velichkin A. I. Teoriya diskretnoy peredachi nepreryivnyih soobscheniy. M.: Sov. radio, 1970. – 296 p.
2. Pomehoustoychivost i effektivnost sistem peredachi informatsii Pod red. A. G. Zyuko.- M.: Radio i svyaz, 1985.- 272 p.
3. Grigorev V. A., Lagutenko O. I., Raspaev Yu. A. Seti i sistemyi radiodostu-pa. - M.: Eko-Trendz, 2005. - 384 p.
4. Volkov L. N., Nemirovskiy M. S., Shinakov Yu. S. Sistemyi tsifrovoy radio-svyazi: bazovyye metody i harakteristiki. - M.: Eko-Trendz, 2005. - 392 p.



УДК 621.391. 037.372

Рассомахін С.Г.

**ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕДАЧІ  
ПОЗИЦІЙНИХ КОДІВ СИГНАЛАМИ З КОМБІНОВАНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ**

Розглянутий метод підвищення якості передачі позиційних чисел на основі OFDM сигналів, які використовують додаткову амплітудну маніпуляцію квадратурних складових. Вирішене оптимізаційне завдання перерозподілу енергії між несучими частотами. Показана можливість зменшення відносної потужності шуму відновлення на 10–15 дБ без додаткових енергетичних витрат.

УДК 519.67 + 681.5

Сорока Л.С., Смеляков К.С., Мешков С.Н., Рубан И.В.

**ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТА ТЕОРИИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ  
ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АНАЛИЗА ДАННЫХ  
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕРМОГРАФИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

Температура как количественный показатель внутренней энергии тел является универсальной характеристикой объектов и процессов физического мира, в котором непрерывно происходит генерация, преобразование, передача, накопление и использование энергии в ее различных формах. Анализ тепловых процессов (температурных полей, потерь тепла и т.п.) позволяет получить разнообразную информацию о состоянии объектов и протекании физических процессов в энергетике, строительстве, промышленности, медицине и многих других приложениях [1].

Наличие непосредственной связи интенсивности теплового излучения тела с его температурой позволяет осуществлять дистанционное измерение (контроль) температуры путем регистрации теплового излучения. Эта область техники получила название термография (или тепловидение). По сложившейся к настоящему времени терминологии под термографией понимают метод анализа пространственного и временного распределения тепловой энергии (температуры) в физических объектах, сопровождающийся, как правило, построением тепловых изображений (термограмм) [2]. Измерение этого поля долгое время осуществлялось контактным методом с помощью датчиков [3].

Однако реализация контактного метода требует значительных материальных и временных затрат на регистрацию и анализ получаемых данных. Многие объекты анализа, например, трансформаторы, приходится разбирать и выводить из строя сроком на несколько часов или дней, что крайне нежелательно. При этом некоторые объекты, например, плотины гидроэлектростанций в ходе анализа скрытых дефектов, вообще невозможно разобрать. Поэтому одним из определяющих требований к анализу состояния объектов по их тепловому полю является безконтактность. Термографический метод позволяет регистрировать температурное поле объектов бесконтактным путем по их цифровым снимкам – термограммам, что делает контроль оперативным, информативным и экономичным [4]. Начало практического применения термографии относится к 60-м годам XX века, когда на рынке появились тепловизоры шведской фирмы AGA. В первую очередь термографические обследования были применены для контроля и диагностики в электротехнике, радиоэлектронике, авиа- и ракетостроении.

Мониторинг – это система комплексных наблюдений параметров объекта с целью получения оценки качественных и количественных изменений во времени и пространстве, для целей прогнозирования состояния объекта под действием внешних причин и принятия рациональных решений в соответствии с ранее подготовленными программами. Целью и заданием термографического мониторинга (ТМ) является разработка мероприятий по контролю и предупреждению ЧС бесконтактным способом на основе анализа термограмм объектов в ИК-спектре. Составляющими элементами термографического мониторинга являются:

- проведение регулярных наблюдений с целью оценки температурного поля объекта;
- формирование базы данных с результатами наблюдений;
- анализ полученных результатов;

- прогнозирование изменений температурных полей объектов;
- принятие управленческих решений.

В настоящее время термографическая диагностика и тепловой контроль представляет собой высокотехнологичную область прикладных исследований, объединяющую достижения не только в создании аппаратуры (тепловизоров), но и в теории теплопередачи, информационных и компьютерных технологиях. Программы тепловизионных осмотров внедрены на всех атомных станциях США [1, 5], в связи с возможностью оперативной оценки обстановки на качественном уровне и предупреждения ЧС. Показана эффективность применения термографии не только для контроля теплового режима объекта, (обнаружения мест перегрева различного происхождения), но и для выявления дефектов его внутренней структуры: трещин, расслоений и иных.

Спектр сфер применения термографического мониторинга является чрезвычайно широким: электроэнергетика, металлургия, машиностроение, строительство, коммуникации, электроника, авиационная и космическая промышленность и ряд иных. При этом одной из важнейших является задача оперативного обнаружения различных аномалий (дефектов, поломок и прочих) для целей своевременного предупреждения ЧС.

Применяемый для этих целей классический (контактный) подход, является трудоемким, дорогостоящим и часто требует вывода оборудования из рабочего режима, что для крупных сооружений таких, например, как плотина гидроэлектростанции вообще невозможно. Применение термографического мониторинга позволяет решить задачу бесконтактного и более эффективно по времени, но лишь на качественном уровне. Используемая в настоящее время схема анализа термоизображений состоит в том, чтобы получить снимок и производить визуальный анализ интересующих объектов по этим снимкам. Поэтому количественный анализ термограмм все еще остается не эффективным по времени и довольно дорогим из-за использования ручного труда специалистов высокой квалификации, а также неприемлемо грубым в отношении расчета характеристик рассматриваемых на термограммах объектов.

Поэтому для организации эффективного термографического мониторинга в широком смысле актуальной является задача разработки и внедрения в практику не только методики термографирования и визуального анализа получаемых термограмм на качественном уровне, но также специализированного программного обеспечения для целей автоматизации обработки получаемых термограмм с заданной оперативностью и точностью. Практически все современные тепловизоры позволяют получать термограммы в цифровом виде. Поэтому целесообразно автоматизировать процесс анализа термограмм на основе использования аппарата теории распознавания образов [6, 7], применяемого для целей сегментации и идентификации объектов на термограммах по их тепловому излучению, и обеспечивающего тем самым возможность получать оценки характеристик объектов с высокой точностью в реальном масштабе времени [8 – 11].

### **Применение аппарата теории распознавания образов для целей решения задач термографического мониторинга**

Базовый принцип тепловой диагностики заключается в сравнении эталонного и анализируемого полей температур для рассматриваемого объекта. Аномалии температуры служат индикаторами дефектов, а величина температурных сигналов и их поведение во времени лежат в основе количественных оценок или иных параметров объектов [1, 5]. К настоящему времени накоплен значительный опыт по применению термогра-

фии в самых различных областях для контроля всевозможных параметров для очень широкого круга приложений [2]. Так, например, в энергетике объектами контроля являются: электрические подстанции, линии электропередач, теплотрассы, тепломеханическое оборудование и ряд иных объектов (рис. 1). Обнаруживаемые дефекты или контролируемые процессы при этом: ухудшение электро- и теплоизоляции, ослабление механического контакта, короткие замыкания, пробой изолятора, износ токоведущих частей и ряд иных. Кроме энергетике, методы термографического мониторинга находят широкое применение при контроле качества продукции на производстве, при проведении геологических работ с целью разведки ископаемых, в задачах обнаружения ЧС по спутниковым и аэрофотоснимкам и ряде иных областей.

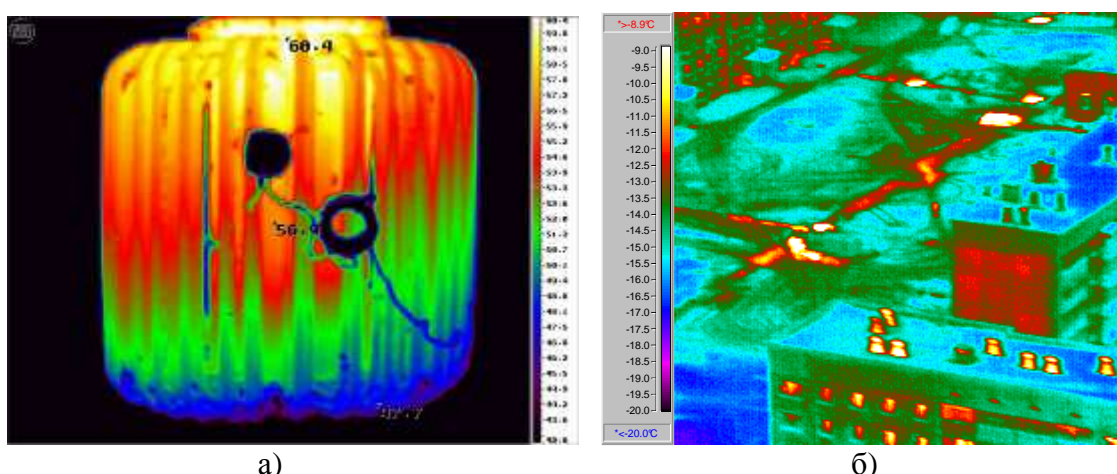


Рисунок 1 – Термограмма корпуса трансформатора, полученная для целей оценивания его состояния (а) и термограмма жилого комплекса и коммуникаций в зимнее время, полученная для целей мониторинга теплотерь (б) [2]

При этом оперативность, точность и экономическая эффективность анализа термограмм являются определяющими критериями, применяемыми для оценивания современных подходов и систем ТМ. Так, например, при обнаружении и анализе ЧС, связанных с возникновением лесных пожаров, или нефтяных разливов оперативность анализа термограмм определяет время реагирования, а точность – адекватность принимаемых мер для ликвидации ЧС; следовательно, от оперативности и точности анализа термограмм зависит масштаб последствий и ущерб от возникновения ЧС. В задачах производственного контроля качества выпускаемой продукции важна высокая точность анализа изделий в реальном масштабе времени. В задачах мониторинга в энергетике одним из ведущих факторов является экономическая эффективность анализа термограмм из-за многочисленности осматриваемых объектов (оборудования, линий электропередач, теплотрасс и иных объектов) и высокой стоимости ручного труда большого числа специалистов высокой квалификации.

Для удовлетворения всем этим требованиям, в условиях, когда термограммы ничего не стоит представлять в цифровом виде, целесообразно положить в основу анализа термограмм применение методов и алгоритмов теории распознавания образов, позволяющих автоматизировать решение задач сегментации и идентификации интересующих объектов, с целью их последующего прикладного анализа. Тем более что для целей анализа температурных полей часто достаточно применить относительно простые пороговые (интервальные) методы сегментации по яркости. На рис. 2 приведен пример комплексного анализа изображения фрагмента щитовой стенки ГЭС с применением

разработанного для этих целей программного комплекса «Thermo V1 05», который позволяет найти интересующие нас термозоны, оценить их метрические параметры и проанализировать температурное поле объекта или явления с использованием термограмм (и температурных шкал) заданного формата. В качестве примера показано нахождение увлажненных участков фрагмента щитовой стенки.

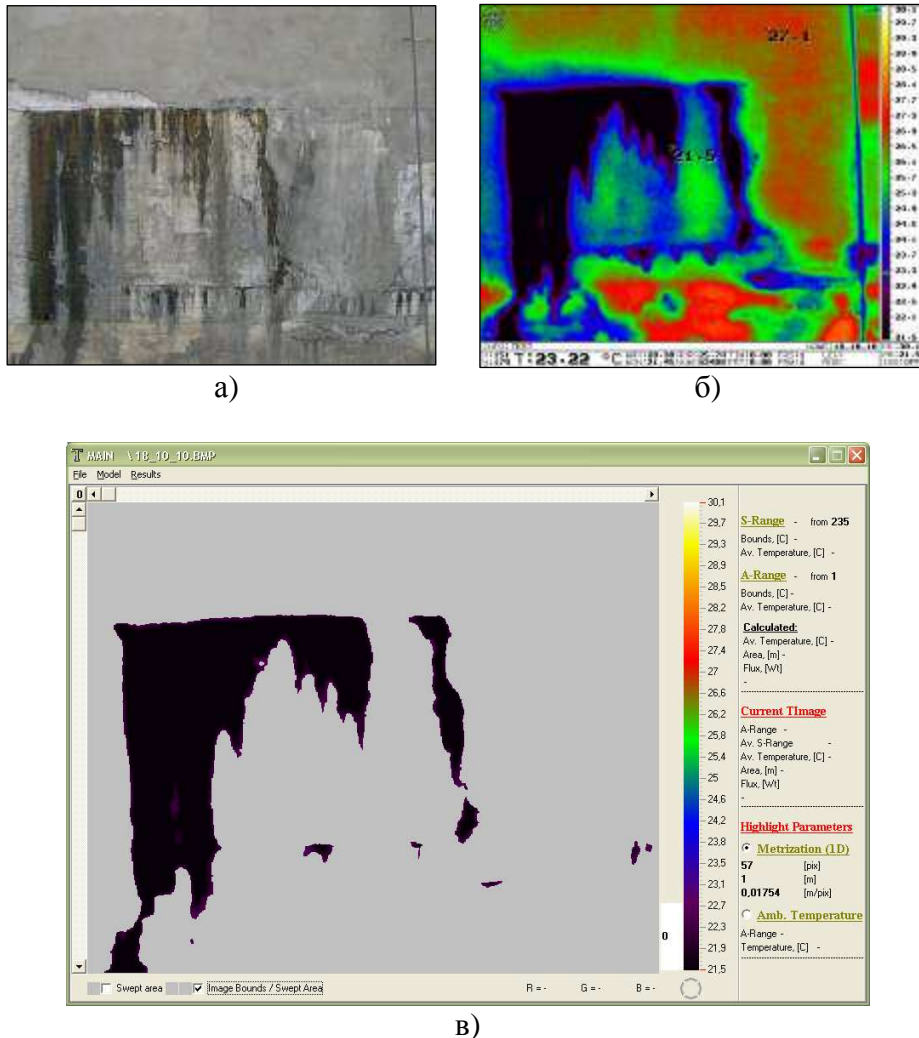


Рисунок 2 – Видимое изображение (а) и термограмма фрагмента щитовой стенки ГЭС (б); нахождение увлажненных участков фрагмента щитовой стенки с использованием программного комплекса «Thermo V1 05» (в)

### Выводы

Используемая в настоящее время схема анализа термоизображений состоит в том, чтобы получить снимок и производить визуальный анализ интересующих объектов по этим снимкам. Поэтому количественный анализ термограмм все еще остается не эффективным по времени, довольно дорогим из-за использования ручного труда специалистов высокой квалификации, а также неприемлемо грубым в отношении расчета характеристик рассматриваемых на термограммах объектов. В этом отношении в работе обоснована актуальность автоматизации анализа термограмм на основе использования аппарата теории распознавания образов, применяемого для целей сегментации и идентификации объектов на термограммах по их тепловому излучению, и обеспечи-

вающего тем самым возможность прикладного анализа объектов с высокой точностью в реальном масштабе времени. Приведенный пример применения программного комплекса «Thermo V1 05» основанного на сегментации интересующих зон и участков термограмм по яркости показывает эффективность анализа термограмм с использованием подобного рода программных комплексов по критериям оперативности, точности и экономической эффективности (на фоне относительно невысоких временных и финансовых затрат на реализацию).

## Литература

1. Неразрушающий контроль: В 7т. / Под общ. ред. В.В. Ключева / В.П. Вавилов. Тепловой контроль: Т. 5. – В 2 кн. – Кн. 1. – М.: Машиностроение, 2004. – 679 с.
2. Маслова В.А., Стороженко В.А. Термография в диагностике и неразрушающем контроле. – Харьков: СМИТ, 2004. – 160 с.
3. P.A. Maisano, B.A. Forbes, O.A. Miskel, M.J. Taylor Cadiangullong RCC Dam: Monitored Performance Versus Design Expectations. – Abstracts of 4-th International Symposium on RCC Dam, 17–19 November 2003, Madrid.
4. Дроздов В.А., Сухарев В.И. Термография в строительстве. – М.: Стройиздат. – 1987. – 238 с.
5. Вавилов В.П., Климов А.Г. Тепловизоры и их применения. – М.: Интел универсал, 2002. – 88 с.
6. R. Gonzalez, R. Woods Digital Image Processing. Second Edition. – Prentice Hall, 2002. – 793p.
7. M. Sonka, V. Hlavak, R. Boyle Image processing, analysis, and machine vision. – California (USA): Cole Publishing Company, 1999. – 770 p.
8. Chen C.H., Pau L.F., Wang P.S.P. Handbook of Pattern Recognition and Computer Vision. – London (UK): Word Scientific Publishing Company, 1993. – 984 p.
9. Смеляков К.С. Модели и методы сегментации границ изображений нерегулярного вида на основе адаптивных масок: Дис. ... канд. техн. наук: 09.03.05.– Харьков, 2005.– 162 с.
10. I.V. Ruban, K.S. Smelyakov, A.S. Smelyakova, A.I. Tymochko Low Contrast Images Edge Detector // EWDTW 06. – Kharkov: Kharkov National University of Radioelectronics (Sohci, Russia, September 15–19, 2006), 2006. – P. 390–396.
11. K.S. Smelyakov, I.V. Ruban, S.V. Smelyakov, A.I. Tymochko Segmentation of Small-sized Irregular Images // EWDTW 06. – Kharkov: Kharkov National University of Radioelectronics (Odessa, Ukraine, September 15–19, 2005), 2005. – P. 235–241.

## Bibliography (transliterated)

1. Nerazrushayuschiy kontrol: V 7t. Pod obsch. red. V.V. Klyueva V.P. Vavilov. Teplovoy kontrol: T. 5. – V 2 kn. – Kn. 1. – M.: Mashinostroenie, 2004. – 679 p.
2. Maslova V.A., Storozhenko V.A. Termografiya v diagnostike i nerazrushayuschem kontrole. – Harkov: SMIT, 2004. – 160 p.
3. P.A. Maisano, B.A. Forbes, O.A. Miskel, M.J. Taylor Cadiangullong RCC Dam: Monitored Performance Versus Design Expectations. – Abstracts of 4-th International Symposium on RCC Dam, 17–19 November 2003, Madrid.
4. Drozdov V.A., Suharev V.I. Termografiya v stroitelstve. – M.: Stroyizdat. – 1987. – 238 p.

5. Vavilov V.P., Klimov A.G. Teplovizoryi i ih primeneniya. – M.: Intel universal, 2002. – 88 p.
6. R. Gonzalez, R. Woods Digital Image Processing. Second Edition. – Prentice Hall, 2002. – 793p.
7. M. Sonka, V. Hlavak, R. Boyle Image processing, analysis, and machine vision. – California (USA): Cole Publishing Company, 1999. – 770 p.
8. Chen C.H., Pau L.F., Wang P.S.P. Handbook of Pattern Recognition and Computer Vision. – London (UK): Word Scientific Publishing Company, 1993. – 984 p.
9. Smelyakov K.S. Modeli i metodyi segmentatsii granits izobrazheniy neregulyarnogo vida na osnove adaptivnyih masok: Dis. ... kand. tehn. nauk: 09.03.05.– Harkov, 2005.– 162 p.
10. I.V. Ruban, K.S. Smelyakov, A.S. Smelyakova, A.I. Tymochko Low Contrast Images Edge Detector EWDTW 06. – Kharkov: Kharkov National University of Radioelectronics (Sohci, Russia, September 15–19, 2006), 2006. – P. 390–396.
11. K.S. Smelyakov, I.V. Ruban, S.V. Smelyakov, A.I. Tymochko Segmentation of Small-sized Irregular Images EWDTW 06. – Kharkov: Kharkov National University of Radioelectronics (Odessa, Ukraine, September 15–19, 2005), 2005. – P. 235–241.

УДК 519.67 + 681.5

Сорока Л.С., Смеляков К.С., Мешков С.Н., Рубан І.В.

**ЗАСТОСУВАННЯ АПАРАТУ ТЕОРІЇ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ З МЕТОЮ  
ЕФЕКТИВНОГО РІШЕННЯ ЗАДАЧ АНАЛІЗУ ДАНИХ  
ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ТЕРМОГРАФІЧНОГО МОНІТОРИНГУ**

З метою організації ефективного термографічного моніторингу в роботі розкривається актуальність автоматизації аналізу термограм на основі використання апарату теорії розпізнавання образів, який дозволяє мінімізувати застосування ручної праці, а також забезпечити можливість аналізу термограм з високою оперативністю і точністю.

Лосев Ю.И., Шматков С.И., Закиров З.З.

### МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

В настоящее время большое внимание уделяется мультимедийности и мульти-сервисности обработки информации, полученной от различных источников. При этом возникает важная задача оценки эффективности систем обработки такой информации.

Современный уровень развития информационных систем характеризуется высокими темпами обновления информации, что накладывает на процесс ее обработки и передачи очень жесткие рамки и предъявляет высокие требования к качеству обслуживания. Известны ряд методик оценки эффективности систем обработки и передачи данных. В основном эти методики учитывают только количественные характеристики обрабатываемых сообщений без учета их важности (ценности).

В этих условиях возможны перегрузки систем обработки и передачи данных. Поэтому необходима такая методика оценки эффективности систем обработки информации, на основе которой можно было бы выработать предложения по борьбе с возникшими перегрузками.

Допустим, используются  $N$  разнородных источников информации. Каждый источник выдает  $n_\beta$  сообщений. Обозначим  $i$ -е сообщение  $\beta$ -го источника  $n_{i\beta}$ .

Эффективность обработки сообщения должна определяться не только их количеством, а и их ценностью  $W_i$ . Если  $i$ -е сообщение от  $\beta$ -го источника не представляет ценности, то  $\mathcal{E}_{i\beta} = 0$ . С физической точки зрения ценность сообщения должна изменяться в пределах от 0 до  $\infty$ . Если без  $i$ -го сообщения обойтись невозможно, т.е. поставленная перед системой обработки задача не может быть выполнена, то ее ценность должна стремиться к бесконечности, в противном случае ее ценность должна стремиться к нулю.

Вышесказанному удовлетворяет зависимость:

$$\mathcal{E}_{i\beta} = \left( \frac{n_{i\beta}}{n_\beta} \right)^{\frac{1}{w_i}}. \quad (1)$$

Так как количество сообщений принимаемых от  $\beta$ -го источника равно  $n_\beta$ , то показатель эффективности использования данных от  $\beta$ -го источника определяется из соотношения:

$$\mathcal{E}_{i\beta_n} = \frac{\sum_{i=1}^{n_\beta} \left( \frac{n_{i\beta}}{n_\beta} \right)^{\frac{1}{w_i}}}{\sum_{\beta} n_\beta}.$$



Поскольку имеется несколько разнородных источников, то показатель эффективности систем обработки информации определяется из соотношения:

$$\mathfrak{E}_{i\beta j} = \sum_{i=1}^{n_{\beta}} \left( \frac{n_{i\beta}}{n_{\beta}} \right)^{\frac{1}{w_i}} + \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_j} \left( \frac{n_{ij}}{n_j} \right)^{\frac{1}{w_j}}, \quad j \neq \beta, \quad (2)$$

где  $j$  характеризует информацию и ее ценность от других разнородных источников.

Первое слагаемое в (2) представляет собой показатель эффективности использования информации для одного источника, а второе слагаемое учитывает использование информации от других разнородных источников. Тогда нормированный показатель эффективности систем обработки всей информации будет равен:

$$\mathfrak{E}_{i\beta j_n} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\beta}} \left( \frac{n_{i\beta}}{n_{\beta}} \right)^{\frac{1}{w_i}} + \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_j} \left( \frac{n_{ij}}{n_j} \right)^{\frac{1}{w_j}}}{\sum_{\beta} n_{\beta} + \sum_j n_j}, \quad j \neq \beta. \quad (3)$$

Для иллюстрации приведенных соотношений построены графики зависимости показателя эффективности использования информации от ее ценности для одиночного источника и группы разнородных источников (рис. 1).

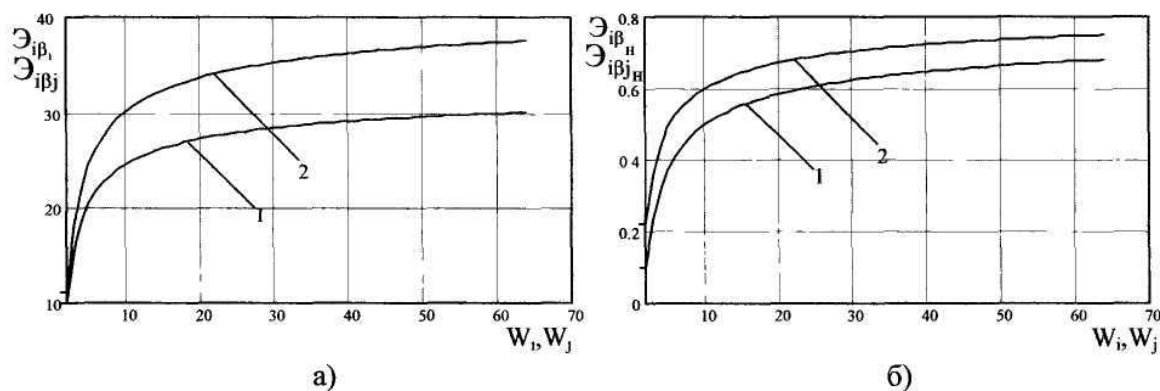


Рисунок 1 – Зависимость показателя эффективности использования информации от ее ценности:

а) – ненормированный показатель, б) – нормированный показатель

Кривые 1 построены для случая использования одиночного источника, кривые 2 – для группы разнородных источников.

Расчеты показателя эффективности систем обработки информации, полученной от одиночного источника, выполнялись в предположении, что количество сообщений  $n_{\beta} = 10$  и ценность информации для каждого сообщения изменяется от 0 до 64. Для группы разнородных источников  $N = 10$ , для каждого источника количество сообщений задавалось случайно (по равномерному закону от 0 до 10, т.е.  $n_j = 0...10$ )

и ценность каждого сообщения изменялось, как и в случае использования информации от одиночного источника, от 0 до 64.

Процессу обработки информации предшествует передача данных по каналу связи с заданной вероятностью, обусловленной степенью воздействия помех. Обозначим вероятность доставки сообщений  $\Phi_{\text{дост.}i\beta j}$ , которая характеризует часть сообщений, доставляемых от источника к потребителю:

$$\Phi_{\text{дост.}i\beta j} = \frac{m_{\text{прд}} - m_{\text{пот}}}{m_{\text{прд}}} = 1 - \frac{m_{\text{пот}}}{m_{\text{прд}}}, \quad (4)$$

где  $m_{\text{пот}}$  – число потерянных при передаче сообщений,  $m_{\text{прд}}$  – число переданных данных.

Процессу передачи данных по каналу связи могут выставляться ограничения по времени доставки данных потребителю ( $T_{\text{д}} \leq T_{\text{д доп}}$ ) и вероятности ошибки ( $P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}}$ ), которые задаются с некоторой степенью неуверенности. Поэтому ограничения будут иметь вид  $P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}}$  с вероятностью  $P_{\text{нч.ош}}$ , находящуюся в интервале от  $P_{\text{нч.ош1}}$ , до  $P_{\text{нч.ош2}}$ . Аналогично можно записать ограничения для времени доставки  $T_{\text{д}} \leq T_{\text{д доп}}$  с вероятностью  $P_{\text{нч.Т}}$ , где  $P_{\text{нч.ош}}$  и  $P_{\text{нч.Т}}$  – вероятности времени и ошибки при нечеткой или неполной информации.

Учесть указанные ограничения можно с использованием коэффициента, который будем называть коэффициентом доверия к информации –  $\gamma_{\text{дов.}}$ , передаваемой от  $j$ -го источника. Следовательно, коэффициент доверия к передаваемой информации учитывает полноту данных, как по времени доставки, так и вероятности ошибок при ее передаче потребителю от группы разнородных источников.

В соответствии с (3), величина нормированного показателя эффективности систем обработки информации от группы разнородных источников с учетом вероятности доставки сообщений и коэффициента доверия к информации может быть определена из соотношения:

$$\Theta_{i\beta j_{\text{дд}}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\beta}} \left( \frac{n_{i\beta}}{n_{\beta}} \right)^{\frac{1}{w_i}} + \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_j} \left( \frac{n_{ij}}{n_j} \cdot \gamma_{\text{дов.}} \cdot \Phi_{\text{дост.}i\beta j} \right)^{\frac{1}{w_j}}}{\sum_{\beta} n_{\beta} + \sum_{j=1}^N n_j}, \quad j \neq \beta. \quad (5)$$

Исследуем показатель эффективности использования информации от группы разнородных источников (5). На рис. 2 приведены зависимости нормированного показателя эффективности использования информации от ценности информации, полученной от группы разнородных источников при  $N$ ,  $n_j$ ,  $W_j$ ,  $W_i$  таких, как при расчетах для рис. 1 (б).

Здесь кривая 1 соответствует значениям  $\Phi_{\text{дост.}}$  и  $\gamma_{\text{дов.}}$ , изменяемым по равномерному закону распределения случайной величины от 0 до 1. Кривая 2 построена при

$\Phi_{\text{дост.}} = 1$  и  $\gamma_{\text{дов.}} = 1$ . Кривые 3...7 построены в предположении, что  $\Phi_{\text{дост.}} = 0.9$ , а  $\gamma_{\text{дов.}}$  изменяется от 0.2 до 1 с шагом 0.2 (кривые 3...7).

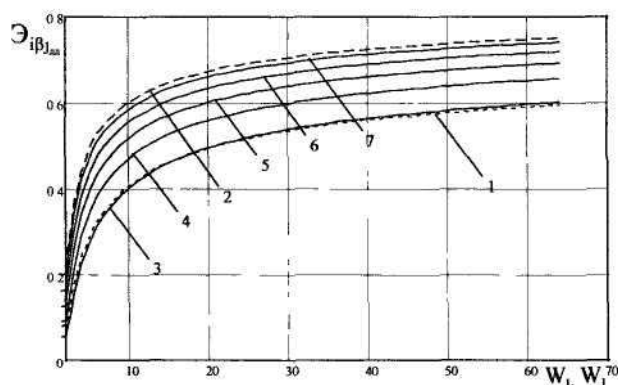


Рисунок 2 – Зависимость нормированного показателя эффективности использования информации от ценности информации, полученной от группы разнородных источников при фиксированном  $\Phi_{\text{дост.}}$ .

Зависимость нормированного показателя эффективности систем обработки информации от коэффициента доверия для группы разнородных источников при фиксированном  $\Phi_{\text{дост.}}$  приведена на рис. 3. Для группы разнородных источников ( $N = 10$ ), для каждого источника количество сообщений случайно (по равномерному закону от 0 до 10, т.е.  $n_j = 0...10$ ) и ценность информации для каждого сообщения изменялось от 0 до 64 при фиксированном значении  $\Phi_{\text{дост.}} = 0.9$ . Кривая 1 соответствует значению  $\gamma_{\text{дов.}} = 0.4$ , кривые 2...6 соответствуют значениям 0.5...0.9.

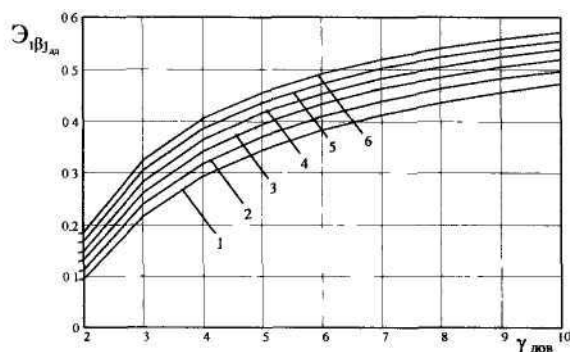


Рисунок 3 – Зависимость нормированного показателя эффективности использования информации от коэффициента доверия для группы разнородных источников при фиксированном  $\Phi_{\text{дост.}}$ .

Из анализа приведенных зависимостей видно, что на показатель эффективности использования информации существенно влияют качественные характеристики системы передачи данных, осуществляющей обмен данными между источниками и потребителями информации. Чем выше значения этих характеристик, тем качественнее параметр исследуемого показателя эффективности. Используя данные зависимости можно

предъявить требования к системе передачи данных для обеспечения необходимой эффективности.

На рис. 4 приведен случай, когда  $\Phi_{\text{дост.}}$  и  $\gamma_{\text{дов.}}$  изменяются по равномерному случайному закону распределения от 0 до 1 и фиксируется ценность информации либо для одиночного, либо для группы разнородных источников. Остальные параметры аналогичны вышеописанным. Кривая 1 построена для фиксированной ценности информации от группы разнородных источников –  $W_j$  на уровне 2,  $W_i$  от одного источника изменяется от 0 до 64. Кривая 2 отображает случай, когда варьируется  $W_j$  и фиксирована ценность информации от одного источника ( $W_i = 2$ ). Кривые 3 и 4 построены для условий фиксирования ценности информации, как для кривых 1 и 2, но значения ценности информации  $W_i$  (кривая 3) и  $W_j$  (кривая 4) фиксируются на уровне 64.

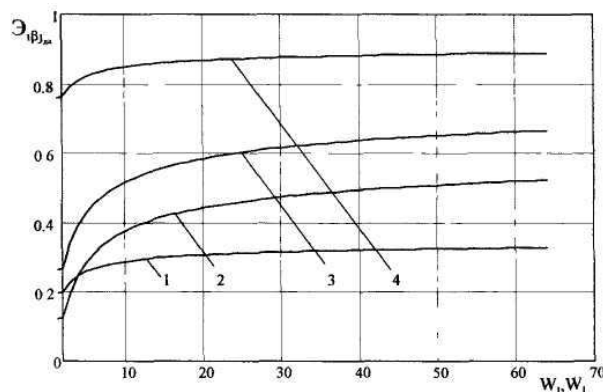


Рисунок 4 – Зависимость нормированного показателя эффективности использования информации от ее ценности для группы разнородных источников

Проанализировав данные зависимости, можно сделать вывод: значение показателя эффективности существенно зависит от использования информации от группы разнородных источников, при этом ценность информации значительно влияет на исследуемый показатель. Значение показателя эффективности значительно выше в случае максимальной ценности информации для группы разнородных источников, чем одиночного.

Предложенная методика позволит численно оценить влияние каждого источника на общую эффективность системы обработки информации с учетом ее ценности. Учет ценности информации позволит разработать метод борьбы с возникающими перегрузками.

УДК 621.391

Лосев Ю.И., Шматков С.И., Закиров З.З.

### **МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ**

Пропонується методика оцінки ефективності систем обробки інформації при одержанні даних від декількох різномірних джерел. Приділяється особлива увага цінності отриманої інформації і якісних характеристик системи передачі даних.

УДК 621.436.313

Товажнянский Л.Л., Ведь В.Е.

**НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ  
ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫПУСКНОГО ТРАКТА ДВС**

Основными стратегическими направлениями развития современного двигателестроения являются исследования, направленные на повышение КПД и мощности двигателей. Мощность двигателей увеличивает скорость перемещения транспортных средств и определяет их маневренность. Рост мощности двигателей в наибольшей степени определяется повышением температуры рабочего тела в двигателе. Тенденция роста этой температуры в мировом двигателестроении, определяемая в 50–60 °С в десятилетие, достигается за счет прогрессивных конструкторских решений и разработки новых жаропрочных сплавов. Однако приемы охлаждения конструктивных элементов из сплавов не являются безграничными и имеют ограниченные возможности, а верхний температурный предел применимости металлических материалов к настоящему времени практически достигнут. Поэтому качественный скачок в двигателестроении может быть совершен только на основе применения конструкционной керамики.

Проблема создания двигателей внутреннего сгорания из керамики требует весьма значительных объемов финансирования, которые превышают возможности отдельных государств. Это связано с созданием принципиально новых керамических материалов, оригинальных методов синтеза керамических элементов сложных форм, осуществляемых при высоких температурах и давлениях, решением весьма обширного круга теплофизических и прочностных, а также материаловедческих технологических, теоретических и технических задач, с созданием теории адиабатного двигателя с соответствующими методами исследований и испытаний. Промышленное решение такой проблемы может быть реализовано проведением интенсивных исследований, определяемых несколькими десятилетиями.

Перспектива ближайшего будущего состоит в использовании комбинированных металлокерамических деталей и специальных керамических покрытий в конструкциях двигателей.

В настоящее время интенсивно ведутся работы над созданием теплозащитных покрытий внутренних поверхностей элементов выпускного тракта ДВС, позволяющих повысить их адиабатность, что достигается высокой степенью тепловой изоляции выпускных каналов газового тракта за счет сохранения тепла его носителем.

Теплозащитные покрытия внешних поверхностей элементов двигателей не позволяют поддерживать заданное теплосодержание рабочего тела и допускают интенсивный внутренний теплообмен между деталями, который приводит к отводу тепла от развитой внешней поверхности двигателя. Это явление исключается при использовании покрытий внутренних поверхностей теплонапряженных элементов конструкции.

Создание керамической теплоизоляции внутренних поверхностей выпускных каналов газа позволит уменьшить удельный расход топлива транспортных средств, токсичность отработавших газов, что приведет к экономии энергоресурсов и улучшению экологической обстановки.

Проблему создания материалов и технологии теплозащитных покрытий внутренних поверхностей выпускных ДВС газа пытаются решить известнейшие научно-исследовательские центры развитых стран: ИПМ НАН Украины, НПО «Технология» (г. Об-

нинск, Россия), МТИ, Даймлер-Бенц, Фольксваген, ККК (Германия) по заказу фирмы Порше, Пикардо (Англия), Дженерал электрик, Форд, Вестнигауз, Пратт Энд Уитни, Камминс Энджин (США) и др. [1–8].

Тематика работ специализированных лабораторий этих компаний связана, в основном, с созданием керамических элементов – фрагментов теплозащитных покрытий на основе титаната алюминия ( $Al_2O_3 \cdot TiO_2$ , тиалита), на поверхность которых отливаются металлы. Технология синтеза тиалита отличается высокой степенью сложности и является весьма дорогостоящей, поскольку кристаллы  $Al_2O_3 \cdot TiO_2$  обладают высокой анизотропией теплового расширения, являющейся причиной образования структурных трещин в изделиях, которые стремятся получить с нулевым значением термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР). Однако технология отливки металлов на фрагменты покрытий, даже нагретые до температур 600–800 °С, не реализована и фирма Порше использует на экспериментальных двигателях гоночных машин только керамические вставки простейших форм. Т.о. задачу внутренней теплоизоляции элементов выпускного тракта ДВС следует считать до настоящего времени нерешенной.<sup>1</sup>

Накопленный авторами теоретический и экспериментальный материал в области керамического материаловедения позволили открыть новый класс керамических материалов, обладающий аномально высокой термостойкостью [9]. На основе этого класса керамики создана технология нанесения теплозащитных покрытий внутренних поверхностей деталей сложных форм, в частности, элементов выпускного тракта ДВС, которые образуются непосредственно в процессе формирования самой детали при отливке металла [10].

Требования, предъявляемые к эксплуатационным характеристикам теплозащитных покрытий внутренних поверхностей элементов газового тракта ДВС, являются трудно достижимыми в одном материале. Покрытия должны одновременно обладать: низкой теплопроводностью, высокой эрозионной стойкостью, термостойкостью, высокой степенью чистоты рабочей поверхности, то есть являться многофункциональными. Сообщение многофункциональных свойств покрытиям можно осуществить на основе принципа создания заданных параметров нескольких свойств, которые присущих каждому из различных материалов, составляющих одно композиционное покрытие. Свойства, которые присущи каждому из материалов, последовательно изменяются по сечению покрытия в соответствии с изменением самих материалов. Т.е. нами предлагается принцип совмещения различных свойств в одном покрытии, что достигается его многослойным строением.

Принцип реализован в созданном многослойном теплоизолирующем покрытии внутренних поверхностей элементов газового тракта ДВС (рис. 1). На этом рисунке приведена условная схема литейного стержня с многослойным покрытием, выполняющим функции тепловой защиты и эрозионной стойкости, а также обеспечивающим высокие газодинамические характеристики каналов для прохождения газов и адгезию покрытия к металлу. Литейный стержень 1 (рис. 1) с такими различными по структуре и свойствам материалами, составляющих покрытие – 2, 3, 4, помещается в литейный ящик и заливается металлом. При высоких температурах происходит деструкция связующего в стержне и его тело становится хрупким. После остывания литейной системы литейный стержень легко выбивается из тела металлической отливки и оголяет покрытие, непосредственное связанное с металлом через его слой 4, ставшим внутренним слоем покрытия металлической детали.

Литейный стержень с покрытиями до отливки на него металла приведен на

рис. 2, из которого следует, что созданная технология позволяет получать теплозащитные покрытия внутренних поверхностей любой сложности.

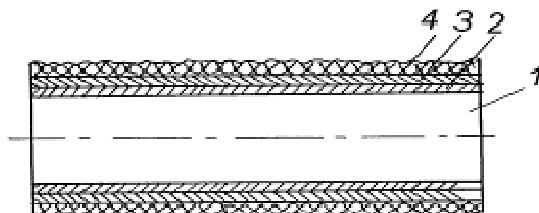


Рисунок 1 – Схема литейного стержня с многослойным теплоизолирующим покрытием:  
1 – литейный стержень; 2 – временный, возгоняемый слой; 3 – эрозионноустойчивый слой;  
4 – теплоизолирующий слой с развитой внешней поверхностью



Рисунок 2 – Литейный стержень с многофункциональным покрытием

Поскольку литейный стержень формирует каналы в деталях, то его поверхностные дефекты зеркально передаются поверхности образованных каналов. Низкая чистота поверхности образованных каналов для прохождения по ним газов значительно ухудшает газодинамические характеристики элементов выпускного тракта двигателя.

Для обеспечения высокой степени чистоты выпускных газовых каналов ДВС были подобраны материалы временного покрытия литейного стержня, которые впитываются в поры последнего и после высушивания обладают блестящей ровной поверхностью с гидрофобными свойствами.

Следующий слой покрытия, наносимый из паст на основе порошков микронных фракций на гладкую поверхность временного покрытия, повторяет ее как зеркальное отображение.

В дальнейшем, при технологической сушке литейного стержня с многослойным покрытием, временный слой, наносимый для обеспечения чистоты канала, возгоняется при температурах до 300 °С. Образующий при этом незначительный зазор между стержнем и покрытием служит компенсатором расширения при увеличении объема стержня в процессе отливки металла.

Разработан и реализован способ искусственного увеличения компенсационного зазора между стержнем и эрозионноустойчивым слоем покрытия созданием демпфирующего слоя из волокнистых оксидов, наносимых как подслой временного покрытия на стержень.

С целью уменьшения величин объемного расширения самих литейных стержней, предложено использовать при их изготовлении специально подобранные материалы с весьма низким ТКЛР, а также с высокой теплопроводностью, для обеспечения возможности снижения градиентов температур в теле покрытия в процессе отливки на него металла и при последующем охлаждении детали.

Материал слоя покрытия 3 (рис. 1), наносимого на такое временное 2, возгоняемое при сушке, создавался практически беспористым и характеризовался повышенной прочностью ( $\sigma_{изг} \geq 6 \text{ МПа}$ ), которая обеспечивает, в основном, высокую эрозионную стойкость. На этот эрозионноустойчивый слой, который в процессе эксплуатации воспринимает воздействие скоростных газовых потоков, наносился теплозащитный слой покрытия – 4, армированный волокнами неорганических оксидов нескольких модификаций. Этот слой при отливке металла на теплоизолированный стержень, в основном, воспринимает механическую и тепловую нагрузку. В процессе же эксплуатации слой 4 выполняет функции теплоизолятора, поскольку он специально создавался с низкой теплопроводностью, соответствующей  $0,3 \text{ Вт/(м К)}$  при температурах более  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ . В зависимости от условий эксплуатации двигателя этот слой может быть сформирован толщиной от 1,0 до 5,0 мм.

Теплозащитный, а особенно эрозионноустойчивый, слои имеют достаточно высокие ТКЛР и обладают способностью увеличивать свои размеры при высоких температурах эксплуатации. Рост размеров слоев покрытий обеспечивает появление радиальных напряжений сжатия в покрытиях внутренних поверхностей металла. Такое напряженное состояние покрытий в замкнутых каналах усиливает степень адгезии покрытий к металлу и способствует снижению вероятности образования термических трещин, развивающихся при охлаждении деталей с покрытиями при термоциклировании. При высоких температурах, соответствующих таковым эксплуатации, материал слоя, выполняющего теплозащитные функции, обладает определенной долей вязкостной составляющей, способной релаксировать приложенные извне деформации без развития в нем и покрытии в целом катастрофических магистральных трещин.

Внешнюю поверхность теплозащитного слоя, на которую отливается металл, признано целесообразным поризировать и химически насыщать соединениями, способствующими достижению низкого угла краевого смачивания чугуном или алюминием - в зависимости от типа отливаемого металла. Такие разработанные технологические приемы способствуют реализации вкладов в адгезионные составляющие покрытия к металлу – химического и электрохимического взаимодействия металла и покрытия, и механического проникновения жидкого металла в открытые поры покрытия.

Описанная последовательность нанесения слоев покрытий, согласованных по свойствам между собой, на литейный стержень обеспечивает получение теплозащитных покрытий без нарушений структуры, которые могут возникать при высоких температурах при формировании покрытий на деталях в процессе отливки металла вследствие возникновения термических напряжений в них [10]. При этом каждый слой, благодаря своим специфическим свойствам, придает покрытию в комплексе многофункциональную направленность, обеспечивающую высокие эксплуатационные показатели теплоизолированным элементам выпускного тракта ДВС.

Созданная технология позволила разработать теплоизолирующие покрытия выпускных каналов головок цилиндров двигателей СМД-60 и ДТ-2, прошедшие стендовые и 100 часовые ресурсные испытания в условиях, отвечающих эксплуатационным. Был достигнут градиент температуры в  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  на покрытии толщиной в 2 мм при температуре стенки  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ .





Рисунок 3 – Отливка алюминия, образовавшая головку канала цилиндров двигателя СМД 60, с внутренним теплоизолирующим покрытием

### Литература

1. Walzer P., Höhler M., Potten Kolber P. Hochtemperatur keramik für Automobilgasturbinen // MTZ – 1976. – Vol. 37. – №11. – P. 479–484, 489.
2. Walzer P., Höhler M., Potten Kolber P. Hochtemperatur keramik für Automobilgasturbinen // MTZ – 1976. – Vol. 37. – №12. – P. 525–529.
3. Bunting A. Ceramic rotor success for gas turbines // Engineer. – 1977. – Vol.244. – №6303. – 13 p.
4. McLean A.F., Davis D.A. The ceramic gas turbine – a candidate powerplant for the middle – and long-term future // SAE Preprint. – 1976. – №760239. – 18 p.
5. Gudel I.E., Schuster P. Keramische Massen auf der Basis von Aluminiumtitanat // Tonindustrie – Zeitung. – 1974. – Vol. 98. – №12. – P. 315–318.
6. Hayes C.W., Zabierek D. Turbine vane ceramic enduvall // Journal Aircraft. – 1975. – Vol. 12. – №4. – P. 247–252.
7. Liebert C.H., Stepka F.S. Ceramic thermal-barrier coating for cooled turbines // AIAA Pap. – 1976. – №729. – P. 1–9.
8. Jordan F.D., Napier J.C., Metcalfe A.G., Duffy T.E. Application of ceramics to a radial inflow gas turbine // SAE Prepr. – 1977. – № 770342. – 13 p.
9. Ведь В.Е. Технология нанесения теплозащитных покрытий внутренних поверхностей деталей газового тракта ДВС // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. научн. тр. – Вып.5.– Харьков: ХАИ. – 1998. –С. 441–445.
10. Ведь В.Е. Оценка эффективности тепловой изоляции головок цилиндров ДВС // Інтегровані технології та енергозбереження. – 1999.–№2.– С. 81–85.

### Bibliography (transliterated)

1. Walzer P., Höhler M., Potten Kolber P. Hochtemperatur keramik für Automobilgasturbinen MTZ – 1976. – Vol. 37. – #11. – P. 479–484, 489.
2. Walzer P., Höhler M., Potten Kolber P. Hochtemperatur keramik für Automobilgasturbinen MTZ – 1976. – Vol. 37. – #12. – P. 525–529.
3. Bunting A. Ceramic rotor success for gas turbines Engineer. – 1977. – Vol.244. – #6303. – 13 p.

4. McLean A.F., Davis D.A. The ceramic gas turbine – a candidate powerplant for the middle – and long-term future SAE Preprint. – 1976. – #760239. – 18 r.
5. Gudel I.E., Schuster P. Keramische Massen auf der Basis von Aluminiumtitanat Tonindustrie – Zeitung. – 1974. – Vol. 98. – #12. – R. 315–318.
6. Hayes C.W., Zabierek D. Turbine vane ceramic enduvall Journal Aircraft. – 1975. – Vol. 12. – #4. – R. 247–252.
7. Liebert C.H., Stepka F.S. Ceramic thermal-barrier coating for cooled turbines AIAA Pap. – 1976. – #729. – R. 1–9.
8. Jordan F.D., Napier J.C., Metcalfe A.G., Duffy T.E. Application of ceramics to a radial inflow gas turbine SAE Prepr. – 1977. – # 770342. – 13 r.
9. Ved V.E. Tehnologiya naneseniya teplozaschitnyih pokrytivy vnutrennih po-verhnostey detaley gazovogo trakta DVS Aviatsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya: Sb. nauchn. tr. – Vyip.5.– Harkov: HAI. – 1998. –p. 441–445.
10. Ved V.E. Otsenka effektivnosti teplovoy izolyatsii golovok tsilindrov DVS IntegrovanI tehnologiyi ta energozberezhennya. – 1999.–#2.– p. 81–85.

УДК 621.436.313

Товажнянський Л.Л., Ведь В.Є.

### **НОВІ МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЯ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ВНУТРІШНІХ ПОВЕРХОНЬ ЕЛЕМЕНТІВ ВИПУСКНОГО ТРАКТА ДВЗ**

Описано властивості нових матеріалів та технологію виготовлення багатофункціональних покриттів внутрішніх поверхонь елементів випускного тракту двигунів внутрішнього згорання.

## **АНОТАЦІЙНИЙ ЗМІСТ**

Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Ulyev L.M., Boldyrev S.A.

### **DIFFINITION ENERGY SAVING POTENTIAL FOR EXTRACTION OF PHOSPHORIC ACID PRODUCTION**

It is shown, that economic potential of energy saving, accessible to processes integration of the examined processes is equal 376 500 dollars of the USA that makes 25 % of cost of the energy consumed working processes today.

Tovazhnyansky L.L., Chunyayev O.N., Zayets I.I., Chunyayeva L.O.

### **NANOTECHNOLOGY IN CHEMO-THERMAL TREATMENT OF FERROCARBON ALLOYS**

The physical mechanisms of surface alloying of the ferrocabon alloys with chromium have been studied. It is proved that under conditions of adequate density of counter diffusion flows of chromium and carbon the formation of carbide layer follows a self-assembly mechanism.

Burdo O.G., Semkov S.V., Stalimbovskaya A.S.

### **POWER MONITORING OF FOOD TECHNOLOGIES**

The analysis of power problems in the world, Ukraine, in agrarian and industrial complex is given. Specificity of power technologies of agrarian and industrial complex is determined. Strategy of the decision of questions of power efficiency in agrarian and industrial complex is offered. The operational experience of academy on problems of increase of efficiency of use of resources in food technologies is resulted.

Rassomakhin S.G.

### **OPTIMIZATION OF POWER PARAMETERS OF THE POSITION CODES TRANSMISSION BY SIGNALS WITH THE COMBINED MODULATION**

The method of improving transmission of position numbers is considered on the basis of the OFDM signals which use additional amplitude manipulation of quadrature constituents. The optimization problem of energy redistribution between bearing frequencies has been decided. The decrease possibility of relative potency of noise renewal by 10–15 dB has been received without additional power expenses.

Soroka L.S., Smelyakov K.S., Meshkov S.N., Ruban I.V.

### **APPLICATION OF PATTERN RECOGNITION FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF THERMOGRAPHIC MONITORING DATA ANALYSIS**

In order to increase the efficiency of thermographic monitoring it is proposed to make use of an automated analysis of thermograms on the grounds of pattern recognition theory. This allows us to process thermograms with a higher accuracy, more quickly and with a minimal use of manual operations.

Soroka L.S., Rassomakhin S.G.

### **APPLICATION OF SEMI CONTINUOUS SIGNALS FOR INTENSIFICATION OF THE USE OF FREQUENCY-POWER RESOURCE OF DATA CHANNELS IN TO ASC**

The method of building of alarm constructions which combine application of discrete and analog methods of modulation on the basis of intervals decompositions in the orthogonal base. Advantages of method are shown as compared to traditional signals in the conditions of hard limitations of physical resource of communication channels.

Usenko Yu.I., Ivanov V.I., Skachcov V.A., Bolyuk S.V.

### **WAYS OF ENERGY-SAVINGS IN BELL ELEKTRIC FURNACES RESISTANCE**

There are elaborated measures on rational use of thermal energy in electrical resistance bell furnaces of type SGZ at annealing of steel wire bounths. Introduction of rational redistribution of the power by the high of heating bell and energy-saving regime of annealing for annealing of this wire allowed essential to reduce energy expenses on the realization of process, to promote productivity of furnaces and to stabilize the quality indexes of processed wire.